

Utsynkingsforsøk med flokkulert avgang fra Engebøfjellet



RAPPORT

Hovedkontor

Gaustadalléen 21
0349 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internett: www.niva.no

NIVA Region Sør

Jon Lilletuns vei 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 37 04 45 13

NIVA Region Innlandet

Sandvikaveien 59
2312 Ottestad
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 62 57 66 53

NIVA Region Vest

Thormøhlensgate 53 D
5006 Bergen
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 55 31 22 14

NIVA Region Midt-Norge

Høgskoleringen 9
7034 Trondheim
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 73 54 63 87

| | | |
|---|---------------------------------------|-----------------------|
| Tittel Utsynkingsforsøk med flokkulert avgang fra Engebøfjellet | Løpenr. (for bestilling) 6624-2014 | Dato 26.9.2014 |
| | Prosjektnr. Undernr. 13378 | Sider Pris 36 |
| Forfatter(e) Christian Vogelsang (NIVA) og Birger Bjerkeng (eget foretak). | Fagområde Gruveindustri | Distribusjon Fritt |
| | Geografisk område Førdefjorden | Trykket NIVA |

| | |
|---|------------------------------------|
| Oppdragsgiver(e) Nordic Rutile AS v/ Nordic Mining ASA | Oppdragsreferanse Mona Schanche |
|---|------------------------------------|

| |
|--|
| Sammendrag På bakgrunn av utsynkingsforsøk har NIVA gitt et estimat for en effektiv kornfordelingskurve for avgang fra Engebøfjellet som tar hensyn til flokkuleringen av partikler som vil skje i den planlagte prosessen for gruveavgang ved innblanding av flokkuleringsmidlet Magnafloc 155 og ved innblanding av sjøvann før deponering i fjorden. |
|--|

| | |
|--|--|
| Fire norske emneord 1. Sedimenteringstest 2. Flokkulert gruveavgang 3. Engebøfjellet 4. Effektiv kornstørrelsesfordeling | Fire engelske emneord 1. Settling test 2. Mine disposal 3. Flocculation 4. Effective grain size distribution |
|--|--|



Christian Vogelsang
Prosjektleder



Claus Beier
Forskningsleder
ISBN 978-82-577-6359-6

Utsynkingsforsøk med flokkulert avgang fra Engebøfjellet

Forord

Nordic Mining ga NIVA i oppdrag å gjøre utsynkingstester for å bestemme effekten av flokkuleringsmiddelet Magnafloc 155 og innblanding av sjøvann på flokkulering og utsynking av avgang fra Engebøfjellet. Hensikten var å få fram en ekvivalent, effektiv kornfordelingskurve som tok hensyn til denne flokkuleringen og kunne gi realistisk utsynking av avgang i en fjord. Kornfordelingskurven er nødvendig for å beregne den forventede spredningen av flokkulert avgang med en modell som beskriver utsynking av uavhengige partikler av varierende størrelse.

Dette har NIVA gjort med god hjelp av tidligere NIVA-medarbeider Siv.ing. Birger Bjerkeng (eget foretak, Org.nr. 912 789 586). Denne rapporten presenterer resultatene fra de innledende flokkuleringstestene og utsynkingstestene og de videre beregningene av effektiv kornstørrelsesfordeling for utsynking av flokkulert avgang.

Flokkulerings- og utsynkingstestene ble gjennomført av NIVA-forskerne Christian Vogelsang og Carsten Schwermer. Birger Bjerkeng har bearbeidet resultatene for å få fram effektive kornfordelingskurver. SINTEF-forskerne Henrik Rye og Raymond Nepstad har bistått med innspill ved avgjørelse av hvilken konsentrasjon av avgangen som skulle benyttes i utsynkingstestene.

NIVA takker Nordic Mining for godt samarbeid og nyttige tilbakemeldinger.

Oslo, 26.09.2014

Christian Vogelsang

Innhold

| | |
|---|-----------|
| Sammendrag | 5 |
| Summary | 7 |
| 1. Innledning | 9 |
| 2. Metodikk ved gjennomføringen | 9 |
| 2.1 Utsynkingsforsøkene | 9 |
| 2.2 Avgang benyttet i forsøkene | 11 |
| 2.3 Flokkulant benyttet i forsøkene | 11 |
| 2.4 Bestemmelse av suspendert stoff | 12 |
| 2.5 Bruk av resultatene for å finne ekvivalent kornfordelingskurver ut fra utsynkingsdata | 12 |
| 2.5.1 Teoretisk forløp av utsynking under ideelle forutsetninger | 12 |
| 2.5.2 Forventet avvik fra ideelle forutsetninger | 13 |
| 2.5.3 Beregning av kumulativ fordeling av partikkelmasse mht. synkehastighet | 14 |
| 2.5.4 Omregning til ekvivalente kornfordelingskurver for aggregert partikkelmasse | 15 |
| 3. Resultater fra utsynkingstestene og estimert effektiv kornfordeling for utsynking av flokkulert avgang i sjøvann | 17 |
| 3.1 Fordelingskurver for synkehastighet | 17 |
| 3.2 Oppsummering av resultatene for kumulative fordelinger mht. synkehastighet og ekvivalent kornstørrelse. | 21 |
| 4. Diskusjon | 26 |
| 4.1 Usikkerhet i analysen av suspendert stoff | 26 |
| 4.2 Betydningen av omrøringshastighet, avgangskonsentrasjon, sjøvannsflokkulering og samlet utsynkingstid for tolkningen av fordelingen av utsynkingshastighet i den flokkulerte avgangen | 27 |
| 4.2.1 Betydningen for konsentrasjonen av avgangspartikler ved start av utsynkingsforsøket og videre utsynkingshastighet | 27 |
| 4.2.2 Betydningen for restinnholdet av avgang i kolonnen ved slutten av utsynkingsforsøket | 29 |
| 4.3 Dosering av flokkulant til hele avgangen eller kun til finfraksjonen? | 30 |
| 4.4 Videre flokkulering i sjøen under deponering? | 31 |
| 5. Konklusjon | 31 |
| 6. Litteraturliste | 32 |
| Vedlegg A. Detaljert beskrivelse av flokkuleringen og overføringen til sjøvann under utsynkingsforsøkene | 33 |
| Vedlegg B. Bestemmelse av minimumsdose Magnafloc 155 som gir tilfredsstillende flokkulering av avgangen | 35 |
| B.1 Metode | 35 |
| B.2 Resultat | 35 |

Sammendrag

Nordic Mining planlegger gruvedrift for produksjon av rutil fra Engebøfjellet der avgangen er tenkt deponert på bunnen av Førdefjorden. SINTEF skal modellere den forventede spredningen av flokkulert avgang. Siden modellen de benytter bare håndterer uavhengig utsynking av enkeltpartikler med ulik størrelse, har NIVA her estimert effektive kornfordelingskurver som gir mer realistisk utsynking av flokkulert avgang i modellen. Disse kornfordelingskurvene ble beregnet på bakgrunn av et sett med lab skala utsynkingsforsøk på avgang flokkulert med Magnafloc 155 og innblanding av sjøvann utført ved NIVAs forskningslab i Oslo.

Før utsynkingsforsøkene ble satt i gang, ble det gjort innledende flokkuleringstester med Magnafloc 155 for å finne doseringen av Magnafloc som ga best flokkulering av den samlede avgangen i ferskvann. Flokkuleringstestene viste at en Magnaflocdose på ca. 15 mg/kg tørrstoff ga den laveste rest-konsentrasjonen av suspendert stoff (SS) i klarfasen etter 10 min sedimentering. Det er ikke angitt noen øvre akseptabel grense for rest-SS i klarfasen etter flokkuleringen.

Resultatene fra en flokkuleringstest på kun finfraksjonen ($<63 \mu\text{m}$) av avgangen antyder at doseringen bør gjøres til hele avgangen. Dette er i tråd med muntlige anbefalinger fra Pasi Mikkola ved Magnafloc-leverandøren BASF.

Det ble beregnet effektive kornfordelingskurver basert på fem adskilte utsynkingsforsøk i sjøvann. I fire av forsøkene ble Magnafloc-dosen på 15 mg/kg tørrvekt avgang benyttet, men konsentrasjonen av flokkulert avgang varierte (2 g/l, 10 g/l eller 100 g/l). Konsentrasjonen på 100 g/l tilsvarer den forventede konsentrasjonen i toppen av avgangsrøret som leder avgangen ned mot deponeringsstedet, mens 2-10 g/l tilsvarer forventet fortykning av utslippsplumen ca. 20-50 meter fra enden av utslippsrøret slik den ble anslått av SINTEF ut fra foreløpige modelleringsforsøk. Tabellen under viser det beste estimatet for en effektiv kornfordelingskurve for den flokkulerte avgangen. Den angir hvor stor andel av partikler (*kumulativ partikkelfraksjon*) som antas å synke langsommere enn angitt hastighet, dvs. som har ekvivalent diameter mindre enn angitt grense. Den er satt sammen av resultatene fra to separate utsynkingsforsøk (forsøk 1 og 4), begge med 10 g/l flokkulert avgang i utsynkingskolonnen. Resultatene fra forsøk 1 er jevnet ut slik at det blir en monotont økende kumulativ fordeling for finfraksjon, og skjønnsmessig forlenget litt i retning store synkehastigheter på bakgrunn av den observerte konsentrasjonsprofilen under omrøring før utsynkingsforsøket ble startet. I forsøk 4 ble flere betingelser endret for å kunne gi en bedre beskrivelse av utsynkingen av den aller fineste fraksjonen av avgangen enn det som var mulig i forsøk 1: i) pre-flokkulering i sjøvann før overføring til utsynkingskolonnen, ii) lavere omrøringshastighet i utsynkingskolonnen før oppstart av utsynkingsforsøket for å redusere knusing av allerede oppbygde fnokker, iii) forlenget forsøksperiode og iv) en mer nøyaktig metode (lavere deteksjonsgrense) for å bestemme konsentrasjonen av partikler i vannsøylen mot slutten av utsynkingsforsøket. Ca. 60 % av den flokkulerte avgangen i forsøk 1 bestod av så store partiklene at de hadde sunket helt ut av vannsøylen allerede før utsynkingsforsøket ble startet (under rolig omrøring) og det var derfor ikke mulig å gi et estimat av denne kornfraksjonen annet enn at disse må bestå av relativt grove partikler.

Utsynkingshastigheten til den aller minste størrelsesfraksjonen av den flokkulerte avgangen ($< \text{ca. } 0,009 \mu\text{m}$) lot seg ikke bestemme ut fra forsøk 4. Men i forsøk 5, der konsentrasjonen av flokkulert avgang ble økt til 100 g/l og forsøksperioden ytterligere forlenget, var det mulig å bestemme utsynkingshastigheten for den kumulative partikkelfraksjonen helt ned til 0,0033 %: ekvivalent diameter på $0,68 \mu\text{m}$ og estimert synkehastighet på $0,003 \text{ cm/min}$ ($5,25 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$). Forsøkene kan ikke si noe om utsynking av partikkelfraksjonen under dette, ut over at den har synkehastigheter som er lavere enn denne nedre grensen. Den effektive kornfordelingskurven som er gjengitt i tabellen under kan anses å gi et rimelig godt bilde av den utsynkingen som kan forventes etter bruk av Magnafloc 155 og med flokkulering i sjøvann. Denne kornfordelingskurven kan eventuelt forlenges ned til en ekvivalent partikkeldiameter på $0,68 \mu\text{m}$ med verdier fra forsøk 5, som angitt over.

Leseren henvises til kapittel 2.5 for en nærmere beskrivelse av faktorer som påvirker utsynkingen av de flokkulerte partiklene og til diskusjonsdelen av rapporten hvor betydningen av disse for resultatene i de respektive utsynkingsforsøkene er drøftet i detalj. Resultatene antyder at flokkulering og utsynking blir mer effektiv jo høyere partikkelkonsentrasjonen er, både når det gjelder hvor raskt hovedmengden av partikler synker ut, og hvor stor restfraksjonen blir. Det kan tyde på at det vil kunne skje en videre konsentrasjonsavhengig flokkulering i fjorden etter utslipp, og anvendelse av en statisk inndeling av partikkelmassen i uavhengige størrelsesfraksjoner vil da bare være tilnærmet riktig.

Tabell. Beste estimatet for en effektiv kornfordelingskurve for den flokkulerte avgangen.

| Forsøksnr. | Kumulativ partikkelfraksjon | Synkehastighet | | Ekvivalent diameter (µm) |
|------------|--------------------------------|----------------|---------|-----------------------------|
| | | cm/minutt | m/s | |
| 1 | 0,40 | 120 | 2,0E-02 | 132 |
| | 0,18 | 50 | 8,3E-03 | 85 |
| | 0,10 | 25 | 4,2E-03 | 60 |
| | 0,045 | 12 | 2,0E-03 | 42 |
| | 0,030 | 8 | 1,3E-03 | 34 |
| | 0,016 | 5 | 8,3E-04 | 27 |
| | 0,0080 | 2,5 | 4,2E-04 | 19 |
| | 0,0045 | 0,8 | 1,3E-04 | 11 |
| 4 | 0,0018 | 0,40 | 6,6E-05 | 7,6 |
| | 0,00063 | 0,19 | 3,2E-05 | 5,3 |
| | 0,00032 | 0,10 | 1,6E-05 | 3,8 |
| | 0,00013 | 0,033 | 5,4E-06 | 2,2 |
| | 0,00009 | 0,008 | 1,3E-06 | 1,1 |

Summary

Title: Sedimentation of flocculated tailings from Engebøfjellet

Year: 2014

Author: Christian Vogelsang and Birger Bjerkeng

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 978-82-577-6359-6

Nordic Mining is planning mining for production of rutile from Engebø Mountain where the tailings are planned to be deposited at the bottom of the Førde fjord. SINTEF is to model the expected spreading of flocculated tailings. Since the model they use only handles independent single settling particles of different sizes, NIVA has estimated effective grain size distribution curves that provide more realistic settling of flocculated tailings in the model. These grain size distribution curves were calculated on the basis of a set of laboratory scale settling tests using tailings flocculated with Magnafloc 155 and seawater performed at NIVA's research lab in Oslo.

Before the settling tests were performed, initial flocculation tests with Magnafloc 155 was conducted to determine the Magnafloc dosage that gave the best flocculation of the combined tailings in freshwater. The flocculation tests showed that a Magnafloc dose of ca. 15 mg/kg dry solids gave the lowest residual concentration of suspended solids (SS) in the supernatant after 10 min settling. No acceptance level for residual SS in the supernatant after flocculation is given. The results from a flocculation test on only the finer fraction ($<63\ \mu\text{m}$) of the tailings suggest that the dosing should be done to the whole combined tailings. This is in accordance with verbal recommendations made by Pasi Mikkola at the Magnafloc supplier BASF.

Effective grain size distribution curves were estimated based on five separate settling tests in seawater. In four of the tests the Magnafloc dose of 15 mg/kg dry weight tailings used, but the concentration of flocculated tailings varied (2 g/l, 10 g/l or 100 g/l). The concentration of 100 g/l was equivalent to the expected concentration at the top of the pipeline that will lead the tailings down towards the deposition site, while 2-10 g/l is equivalent to the expected dilution of the discharge plume ca. 20-50 meters from the end of the pipeline as estimated in preliminary model studies. The table below shows the best estimate of the effective grain size distribution curve for the flocculated tailings. It gives the fraction of particles (*cumulative particle fraction*) that is expected to settle more slowly than the given settling rate, i.e. the fraction that has an equivalent diameter below the given limit. It is combined from results from two separate settling tests (test no. 1 and 4), both with 10 g/l flocculated tailings in the settling column. The results from test no. 1 is smoothed so that there is a monotone increasing cumulative distribution within the finer size fraction, and discretionary prolonged in the direction of somewhat larger settling rates based on the observed concentration profile during mixing prior to the start-up of the test. In test no. 4 several of the test conditions were altered to give a better description of the settling of the finest fraction of the tailings than what was possible in test no. 1: i) pre-flocculation in seawater prior to transfer to the settling column, ii) lower stirring rate in the settling column before start-up of the settling test to reduce breaking of already built-up flocs, iii) prolonged settling period and iv) a more accurate method (lower detection limit) to determine the concentration of particles in the water column towards the end of the settling test. Ca. 60 % of the flocculated tailings in test no. 1 consisted of so large particles that they had already settled out of the water column before the settling test had started (during gentle stirring), therefore it was not possible to estimate the grain size distribution of this particle fraction other than it will consist of relatively large particles. The settling rate of the very smallest size fraction of the flocculated tailings ($<\text{ca. } 0.009\%$) was not possible to determine from the results in test no. 4. But in test no. 5, where the concentration of flocculated tailings was increased to 100 g/l and the settling period was further prolonged, it was possible to determine the settling rate for the cumulative particle fraction all the way down to 0.0033 %: equivalent diameter of $0.68\ \mu\text{m}$ and estimated settling rate of $0.003\ \text{cm/min}$ ($5,25\ \text{E-}07\ \text{m/s}$). Settling rates of particle size fractions below $0.68\ \mu\text{m}$ are not possible to determine from these tests, other than that they will be

lower than the stated settling rate of the 0.68 μm size fraction. The effective grain size distribution curve given in the table below can be considered as a reasonably good representation of sinking properties of the tailings after use of Magnafloc 155 and with flocculation in seawater. This distribution curve may be extended down to an equivalent particle diameter of 0.68 μm using values from test no. 5, as specified above.

Table. Best estimate of effective grain size distribution curve for flocculated tailings.

| Test no. | Cumulative Particle fraction | Settling rate | | Equivalent diameter (μm) |
|----------|---------------------------------|---------------|---------|--|
| | | cm/minutt | m/s | |
| 1 | 0,40 | 120 | 2,0E-02 | 132 |
| | 0,18 | 50 | 8,3E-03 | 85 |
| | 0,10 | 25 | 4,2E-03 | 60 |
| | 0,045 | 12 | 2,0E-03 | 42 |
| | 0,030 | 8 | 1,3E-03 | 34 |
| | 0,016 | 5 | 8,3E-04 | 27 |
| | 0,0080 | 2,5 | 4,2E-04 | 19 |
| | 0,0045 | 0,8 | 1,3E-04 | 11 |
| 4 | 0,0018 | 0,40 | 6,6E-05 | 7,6 |
| | 0,00063 | 0,19 | 3,2E-05 | 5,3 |
| | 0,00032 | 0,10 | 1,6E-05 | 3,8 |
| | 0,00013 | 0,033 | 5,4E-06 | 2,2 |
| | 0,00009 | 0,008 | 1,3E-06 | 1,1 |

Factors that influence the settling of the flocculated particles are described in more detail in chapter 2.5 and are discussed in detail in the discussion section of the report. The results suggest that the flocculation in the fjord and the settling is more effective the higher the particle concentration, both when it comes to how fast the main fraction of the tailings is settling and how large the residual fraction becomes. It is indicated that a concentration-dependent flocculation might occur in the fjord after discharge, and the use of a static sectioning of the particles in independent size fractions will then only be approximately correct.

1. Innledning

Nordic Mining planlegger gruvedrift for produksjon av rutil fra Engebøfjellet der avgangen er tenkt deponert på bunnen av Førdefjorden. Flokkuleringen, avvanningen og den videre deponeringen av avgang fra Engebøfjellet er forventet å foregå som følger:

- En ca. 15 vekt %¹ slurry av finmalt avgang i ferskvann tilsettes en minimumsmengde Magnafloc 155 for å flokkulere til større aggregater som synker raskt ut.
- Denne slurrien går så til en fortykker, hvor hoveddelen (ca. 90 %) av ferskvannet tas ut, slik at avgangen ut fra fortykkeren har et faststoffinnhold på ca. 60 vekt %.
- Avgangen ledes deretter inn i et blandekar under vannspeilet i fjorden, som får tilført sjøvann fra ca. 100 m dyp til et tørrstoffinnhold på ca. 10 vekt %.
- Avgangen ledes så gjennom et rør ned på ca. 300 m dyp hvor avgangsplumen sedimenterer videre ned gjennom vannsøylen og sprer seg videre langs sjøbunnen på initielt ca. 320 m dyp.

Magnafloc 155 tilsettes avgangen for å kunne resirkulere mest mulig ferskvann i prosessen. En tilleggseffekt er en bedre sedimentering av avgangen i fjorden. Flokkuleringen gjør at partiklene aggregeres og dermed synker ut fortere pga. den større massen disse aggregerte partiklene får. SINTEF og Det Norske Veritas modellerer den forventede spredningen av avgang i Førdefjorden. Modellen som benyttes kan bare håndtere uavhengig utsynking av enkeltpartikler med ulik størrelse.

NIVAs oppgave har vært å gjøre labskala utsynkingsforsøk med tilsetning av Magnafloc og sjøvann for å se på flokkuleringseffekten, og ut fra disse forsøkene estimere effektive kornfordelingskurver som gir realistisk utsynking av flokkulert avgang når utsynkingen beregnes for uavhengige enkeltpartikler.

Utsynkingsforsøkene er gjort ved NIVAs forskningslab i Oslo. Siden gruvedriften ved Engebøfjellet foreløpig kun er på planleggingsstadiet, ble forsøkene gjort med oppmalt eklogitt-malm fra gruveområdet med en kornfordeling som tilsvarer den en forventer å få under produksjon.

2. Metodikk ved gjennomføringen

2.1 Utsynkingsforsøkene

Det ble kjørt fem utsynkingsforsøk med variasjoner i avgangsmengde, flokkulantdose og hvordan flokkulantdoseringen ble gjort under flokkuleringen. Utsynkingsforsøkene ble utført slik at de mest mulig skulle etterligne det som vil skje med avgangen i produksjonsprosessen, dvs. forholdene i fortykkeren hvor innblanding av flokkulanten og flokkuleringen av avgangen i hovedsak vil skje, i blandekaret med tilsetning av sjøvann og mulig tilleggsflokkulering og ved transporten ned gjennom utslippsrøret.

Hvert utsynkingsforsøk kan deles inn i tre operasjoner:

- 1) Flokkulering av avgangen i ferskvann. Her ble tørr avgang suspendert i springvann, tilsatt Magnafloc 155 og vendt om et antall ganger for å få god innblanding og flokkulering av avgangen.
- 2) Overføring til sjøvann i utsynkingskolonnen. I forsøk 1-4 ble den flokkulerte avgangen etter ca. 1 times henstand overført til sjøvann ved å dekantere av klarfasen, forsiktig resuspendere den flokkulerte avgangen i omtrent samme mengde sjøvann og overføre dette til utsynkingskolonnen som var fylt med sjøvann i løpet av ca. 1 min under omrøring. I forsøk 4 ble målesylindere vendt om noen ganger på nytt etter tilsetning av sjøvann for å få sekundær flokkulering som i blandetanken ved gruvedrift. For å holde den flokkulerte avgangen i suspensjon uten i for stor grad å knuse avgangsflokkene som var dannet under flokkuleringen, ble omrøringen justert til 150 rpm i de tre første forsøkene. For å redusere faren for flokk-knusing ble omrøringen redusert til 30 rpm i de to siste forsøkene, samtidig som rørverket ble justert slik at den vertikale

¹ I de foreløpige beregningene til Nordic Mining er konsentrasjonen av avgang inn til fortykkeren satt til 30 vekt% tørrstoff, men ifølge Pasi Mikkola ved BASF (leverandøren av Magnafloc 155 til Nordic Mining) vil det sannsynligvis være nødvendig med noe mer innblanding av prosessvann. Det ble derfor anbefalt å benytte 15 vekt% tørrstoff i flokkuleringen i forkant av utsynkingstesten.

innblandingen ble bedre. Sjøvannet var hentet fra 60 m dyp ved NIVAs forskningsstasjon på Solbergstrand sør for Drøbak og holdt romtemperatur når det ble benyttet. Temperaturen i rommet er termostatkontrollert, og vannet i tilsvarende dunker er senere målt til $17,5 \pm 0,5$ °C. Rest-mengde suspendert stoff (SS) i klarfasen ble bestemt. I ett tilfelle (forsøk 5) ble det ikke helt av noen klarfase, men i stedet ble det tilsatt en saltlake av sjøsalt etter overføring fra målesylindrene til utsynkingskolonnen for å kompensere for ferskvannet som fulgte med den flokkulerte avgangen. Den resulterende saliniteten (saltholdigheten) i kolonnen ble målt til 39,6 ‰, mens den i de øvrige forsøkene var ca. 34 ‰.

- 3) Utsynking av flokkulert avgang i utsynkingskolonnen. Den initielle vannsøylen i utsynkingskolonnen var 107 cm og det var montert tappepunkter for prøveuttak 10, 30, 50, 70 og 90 cm fra bunnen av kolonnen (se **Figur 1**). Etter ca. 5 min omrøring etter overføringen av avgangen ble det tatt ut nullprøver å 50 ml fra alle tappepunktene og fra ca. 1 cm fra under vannoverflaten. Deretter ble omrøringen stoppet, røreverket umiddelbart trukket opp av kolonnen og utsynkingstesten startet. I alle de 5 forsøkene ble det tatt ut prøver fra alle tappepunktene og ca. 1 cm under vannoverflaten etter ca. 2 min, 5 min, 20 min og 60 min, og i forsøk 1 og 3-5 ble det tatt ut ytterligere prøver fra 2 timer og opp til 10 dager under forsøk 5. Forskjell i varighet gjør at forsøkene i ulik grad kan si noe om utsynking av finfraksjonen, og sluttkonsentrasjonene blir ikke direkte sammenlignbare. Alle prøvene ble analysert for SS (se **Kapittel 2.4**). Dette gir datasett som brukes til å beregne ekvivalent kornfordelingskurve.

Nøkkeltall for gjennomføringen av de fem utsynkingsforsøkene er oppsummert i **Tabell 1**. En mer detaljert beskrivelse av den initielle flokkuleringen og overføringen til sjøvann i utsynkingskolonnen er gitt i **Vedlegg A**.

Tabell 1. Oppsummering av nøkkeltall for gjennomføring av utsynkingsforsøkene.

| Forsøk nr | Flokkulering | | | Utsynking | | | | |
|-----------|--------------|-----------------|------------------|--------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------|
| | Kons. avgang | Kons. Magnafloc | Rest-SS klarfase | Kons. Avgang | Omrørings-hast. før utsynking*** | Kons. avgang ved start utsynking* | | Varighet av utsynkingsfasen |
| | % | mg/kg TS | % av total | g TS/L | rpm | g TS/L | % av overført | minutter (timer) |
| 1 | 15 | 15 | 0,008 | 10 | 150 | 2,20 | 22,0 | 340 (5,7) |
| 2 | 15 | 15 | 0,022 | 2 | 150 | 0,582 | 29,1 | 60 (1,0) |
| 3 | 15 | 2,5/8** | 1,11 | 10 | 150 | 2,89 | 28,9 | 1 080 (18) |
| 4 | 15 | 15 | 0,016 | 10 | 30 | 0,274 | 2,74 | 5 760 (96) |
| 5 | 15 | 15 | - | 100 | 30 | 0,676 | 0,676 | 14 220 (237) |

* Beregnet som et gjennomsnitt av 5 uttak fra 10-90 cm dyp i kolonnen rett før omrøringen ble stoppet.

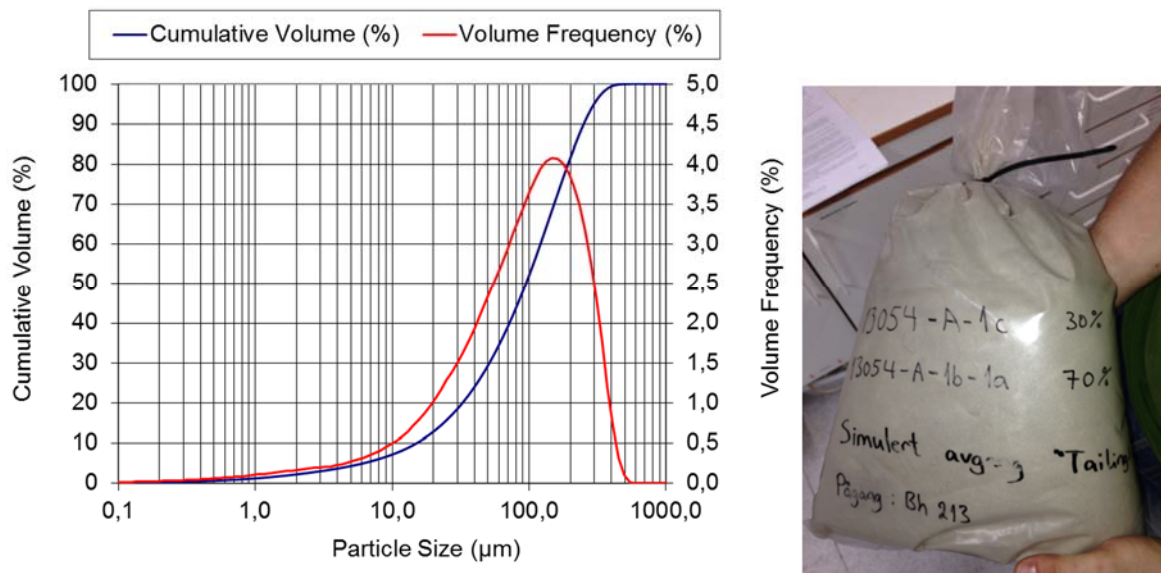
** Kun finfraksjonen (<63 µm) ble innledningsvis flokkulert med Magnafloc 155 (8 mg/kg TS), men den flokkulerte finfraksjonen ble slått sammen med resten av avgangen før overføring til utsynkingskolonnen. Flokkulantdoseringen for hele avgangen var 2,5 mg/kg TS, som samsvarer med dagens konsesjonsgrense.

*** I de tre første forsøkene ble det rørt med 150 rpm og 4 sett lodrette rotorblader i ulik høyde; i det fjerde og femte forsøket ble omrøringen gjort mer forsiktig, med 30 rpm, med større og skråstilte rotorblader for å øke vertikal blandingseffekt av omrøringen.

Som Tabell 2 viser, ble det brukt tre ulike partikkelkonsentrasjoner i utsynkingskolonnen (2 g/l, 10g/l og 100 g/l). Dette ble gjort for å se om dette påvirker flokkulering og utsynking ved bruk av Magnafloc, siden det er kjent at flokkulering i sjøvann er konsentrasjonsavhengig. Slik gruvedriften er planlagt, vil konsentrasjonen i blandekummen ved innblanding av sjøvann og i avgangsrøret være ca. 100 g/l. Ut fra foreløpige modelleringsforsøk har SINTEF anslått at fortynningen av utslippsplumen ca. 20-50 meter fra enden av utslippsrøret tilsvarer en totalkonsentrasjon (før utsynking av partikler tas hensyn til) på ca. 10 - 2 g/l.

2.2 Avgang benyttet i forsøkene

Det ble benyttet oppmalt malm med samme kornfordeling (se Figur) som ved planlagt produksjon. Oppmalingen ble gjort ved NTNU, og kornfordelingen samsvarte godt med oppmalt malmprøve benyttet i tidligere forsøk.



Figur 2. Kornfordeling i oppmalt malmprøve mottatt fra NTNU og brukt som avgang i forsøkene. Kornfordelingen ble bestemt av NTNU. Til høyre er posen avgangen kom i.

2.3 Flokkulant benyttet i forsøkene

Magnafloc 155 ble benyttet som flokkulant i alle forsøkene. Dette er en akrylamid-basert moderat anionisk flokkulant fra BASF. Det ble laget en stokkløsning på 0,1 vekt% ved å forsiktig drysse Magnafloc 155 i pulverform ned i deionisert vann under kraftig omrøring. Da pulveret var godt fordelt i hele vannmengden, ble omrøringen satt noe ned for å unngå innpisking av luftbobler. Etter noen timer ble løsningen satt på rolig omrøring til dagen etter. Løsningen ble lagret ved 4°C. Samme batch ble benyttet i alle forsøkene (3.12.2013 - 13.5.2014).

Før utsynkingsforsøkene ble det gjort en innledende flokkuleringstest for å bestemme optimal dosering av Magnafloc 155 for å få best mulig flokkulering av avgangen. Testen tok utgangspunkt i en protokoll anbefalt og tilsendt fra BASF ved Pasi Mikkola. Magnafloc ble tilsatt avgang suspendert i ferskvann i en målesylinder som deretter ble vendt om et antall ganger; restkonsentrasjon av partikler i vannfasen ble målt etter 10 minutters sedimentering.

Fremgangsmåte og resultat er nærmere beskrevet i Vedlegg B. Lavest restkonsentrasjon i målesylinderen ble oppnådd med 15 mg Magnafloc/kg tørrstoff, og med 12 vendinger av målesylinderen.

Ut fra et miljøsynspunkt vil den dosen av Magnafloc 155 som gir den laveste konsentrasjonen av suspendert stoff (SS) i klarfasen etter flokkuleringen i utgangspunktet kunne anses som den optimale doseringen. I de fem utsynkingstestene som ble kjørt, ble det brukt to ulike Magnafloc 155-doseringer:

- I utsynkingstest nr. 1, 2, 4 og 5 ble det dosert 15 mg/kg tørrstoff. Her ble doseringen gjort til den samlede avgangen.
- I utsynkingstest nr. 3 ble det dosert 2,5 mg/kg tørrstoff, som samsvarer med dagens konsesjonsgrense. Her ble doseringen gjort til partikkelfraksjonen <63 µm (tilsvarte ca. 8 mg/kg finfraksjon), men den flokkulerte finfraksjonen ble blandet med resten av avgangen før overføring til utsynkingskolonnen.

2.4 Bestemmelse av suspendert stoff

I alle utsyningsforsøkene ble suspendert stoff (SS) bestemt som suspendert tørrstoff (STS, NIVA-metode B2) ved filtrering:

- Ca. 50 ml prøve ble filtrert gjennom et ferdig tørket og veid GF/F-filter (porevidde 0,7 μm). Filtrert volum ble bestemt som vekttapet fra prøveflaske etter at vannprøven var tatt ut. Etter filtreringen ble det filtrert ca. 100 ml destillert vann gjennom det samme filteret for å vaske ut salter fra filteret og avsatt materiale.
- Filteret ble tørket ved 105 °C til konstant vekt, og filterets vektøkning ($W_p - W_o$) ble brukt til å beregne SS:

$$SS \left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] = \frac{W_p - W_o}{V_p} \quad [1]$$

der W_o er vekten av filteret før filtrering, W_p er vekten av filteret med prøvematerialet etter tørking, og V_p er filtrert prøvolum. W_p ble korrigert for vektøkningen av et filter hvor kun 50 ml destillert vann var filtrert gjennom.

- Måleområdet for metoden er avhengig av prøvolumet. For en 50 ml sjøprøve kan man i teorien måle ned i <10 mg/l, men usikkerheten i måleresultatet kan da bli uakseptabel stor.

For prøver i utsyningsforsøk 4 og 5, der SS-verdien var forventet å være <50 mg/l, ble konsentrasjonen av suspendert stoff bestemt som totalt suspendert materiale (TSM, NIVA-metode B 4). I prinsippet er metoden lik den som er beskrevet for bestemmelse av STS ovenfor, men det benyttes et Nucleopore kapillærfilter med porevidde 0,4 μm , og det benyttes en mikrovekt (Satorius 4503 Micro) ved veiing av filteret. Filteret tørkes ved 40-50 °C i 2 timer. For en 50 ml prøve går måleområdet for metoden ned til ca. 0,1 mg/l, men måleusikkerheten for verdier <2 mg/l ligger i størrelsesområdet 0,2 mg/l.

2.5 Bruk av resultatene for å finne ekvivalent kornfordelingskurver ut fra utsyningsdata

2.5.1 Teoretisk forløp av utsynking under ideelle forutsetninger

Hvis enkeltpartikler eller partikkelaggregater synker uavhengig av hverandre i stillestående vann, med synkehastigheter som varierer med størrelse, tetthet og form, kan utsynkingsegenskapene for en gitt blanding av partikler og aggregater beskrives som en kumulativ fordelings-funksjon $F(V)$ over synkehastighet V , dvs. at en vektandel $F(V) \in [0,1]$ har synke-hastighet $< V$.

Vi tenker oss nå at vannsøylen først røres effektivt om, slik at partikler av alle størrelser er homogent fordelt over dypet med total konsentrasjon C_{sum} , og at det deretter skjer et brått omslag fra full omrøring til stagnante forhold med utsynking av partikler gjennom stillestående vann. Ved tid t fra start av utsynkingen vil da partikler med synkehastighet V være fordelt med startkonsentrasjon fra dyp $z = V \cdot t$ og nedover, mens de er borte fra overflaten og ned til dette dypet, altså med en skarpt avgrenset fordeling i dypet. I dyp z ved tid t vil partikler med synkehastighet $< V$ fortsatt finnes i startkonsentrasjonen, mens partikler med synkehastighet $> V$ er borte, fordi de har sunket ned til større dyp. Hvis vi måler samlet partikkelkonsentrasjon c_{ik} i et sett av gitte avstander z_i nedover fra overflaten ved et sett av tidspunkter t_k etter start av utsyningsfasen, vil konsentrasjonene nettopp tilsvare den andelen av partikkelmassen som har synkehastighet $V_{ik} < z_i / t_k$:

$$c(z_i, t_k) = C_{sum} F(z_i / t_k)$$

Fordelingen $F(V)$ må være en monotont økende funksjon av V , dvs. at konsentrasjonene bør øke med dypet ved gitt tid og avta med tid i gitt dyp, og slik at konsentrasjoner målt ved samme forholdstall z_i / t_k skal være omtrent like. Alle datapunkter fra ett forsøk vist i et plott av konsentrasjon c_{ik} mot $V_{ik} = z_i / t_k$ skal da ligge samlet langs én kurve. Denne kurven vil gi et direkte bilde av fordelingen $F(V)$ når den skaleres mot totalkonsentrasjonen av partikler, dvs. den konsentrasjonen som kan beregnes hvis total partikkelmengde fordeles jevnt over kolonnen.

2.5.2 Forventet avvik fra ideelle forutsetninger

De forutsetningene som er antatt for den ideelle beskrivelsen ovenfor er imidlertid ikke helt realistiske; de er forenklinger som bare kan være tilnærmet oppfylt.

- For det første vil ikke forutsetningen om homogen fordeling av hele partikkelmengden over alle dyp under omrøring være 100 % oppfylt. i. Konsentrasjonsprofilen vil i praksis være et resultat av at det under omrøring etterhvert innstiller seg en likevekt som et resultat av balansen mellom utsynking, som frakter partiklene nedover, og omrøring, som ved økende konsentrasjon med dyppet gir en netto transport av partikler oppover i vannsøylen. Små partikler som synker langsomt kan bli omtrent homogent fordelt, mens større partikler som synker raskt vil være konsentrert mot bunnen av vannsøylen. Partikler som synker raskere enn største vertikale vannbevegelse rettet oppover, vil forsvinne helt fra vannfasen etter en viss tid med omrøring.
- For det andre er det ikke sikkert at aggregatene fra flokkuleringsprosessen synker ut uavhengig av hverandre. Det er rimelig å anta at partikler og aggregater som synker gjennom vannsøylen kolliderer med og drar med seg partikler eller aggregater som synker langsommere, og derved øker i størrelse og synkehastighet ettersom de beveger seg nedover i vannsøylen.

Tidligere forsøk uten flokkuleringsmidler (Iversen m.fl., 2009) ga mye raskere utsynking enn forventet ut fra størrelsesfordelingen for enkeltpartikler, og med liten vertikalgradient i konsentrasjonene; i stedet var forløpet etter den første timen dominert av parallell nedgang over tid i hele vannsøylen, med lite økning mot større dyp. En mulig forklaring av slike resultater kan være at gjennomsnittlig synkehastighet øker fra toppen av kolonnen pga. ytterligere aggregering nedover i vannsøylen. Resultatene tydet også på at effektiv synkehastighet ved gitt restfraksjon igjen i vannsøylen øker med konsentrasjon, dvs. at aggregering er mer effektiv ved høyere konsentrasjoner.

I forsøkene med flokkuleringsmidler som beskrives her, kan utsynkingen i større grad være styrt av dannelse av stabile aggregater i den innledende flokkuleringsfasen, og i mindre grad av aggregering underveis under utsynkingen.

- For det tredje vil det ikke være et brått skifte fra omrøring av vannsøylen til helt stagnante forhold uten bevegelser i vannet. Det vil alltid være en overgangsfase hvor vannbevegelsene dør ut, mens utsynkingen blir mer og mer enerådende. I denne overgangsfasen vil turbulens og konveksjon i vannsøylen bidra til å fordele partikler vertikalt og jevne ut den skarpe øvre avgrensningen en tenker seg for partikler av gitt synkehastighet under ideelle forhold. Dette vil være mest effektivt for partikler med liten utsynkingshastighet. I siste fase av de mest langvarige forsøkene vil bare partikler eller aggregater med svært langsom synkehastighet være igjen, og da kan selv ganske langsomme vannbevegelser i form av virvler eller konveksjon som kan bidra til å holde gjenværende partikler fordelt i vannsøylen og motvirke utsynking.

En mulig årsak til slike virvler kan være restbevegelse i vannet etter uttak av prøver. Når prøvene tappes ut, vil vannet strømme mot uttappingsrøret fra alle kanter pga. trykkfallet mot åpningen, og når røret stenges, vil det oppstå trykkbølger og reststrømmer i kolonnen. I hver omgang tas nederste prøve først, og deretter i sekvens oppover i vannsøylen; det betyr at hver prøve kan gi en viss vertikal blanding som påvirker prøvene lenger opp.

En annen mulig årsak er at kolonnen står på et gulv som er kaldere enn romtemperaturen ellers, og det kan tenkes vertikal roterende konveksjon drevet av avkjøling mot gulvet og oppvarming langs veggene i kolonnen. Hvis det sprer seg til hele vannsøylen, kan det være en forklaring på de homogene forholdene øverst i kolonnen, hvor partikkelinnholdet i særlig grad består av små aggregater med lav synkehastighet også ut fra de ideelle forutsetningene. Dette kan peke i retning av at en enkel beregning ut fra de forenklede antagelsene vil underestimere utsynkingshastigheten for partikler gjennom stillestående vann, og at en bør unngå å basere seg for mye på resultatene i nærheten av toppen av kolonnen.

Hvis omrøringen kan parametriseres som en vertikal blandingskoeffisient k (med dimensjon lengde²/tid), vil det være likevekt mellom utsynking og vertikalblanding hvis konsentrasjonsprofilen $\gamma(\tilde{z})$ for partikler med synkehastighet V oppfyller betingelsen

$$V \cdot \gamma(\tilde{z}) = k \frac{\partial \gamma(\tilde{z})}{\partial \tilde{z}}$$

Hvis k er lik i alle dyp, kan dette integreres til

$$\gamma(\tilde{z}) = \gamma(\tilde{z}_0) \cdot \exp\left(\frac{V}{k}(\tilde{z} - \tilde{z}_0)\right)$$

dvs. at konsentrasjonen øker eksponentielt nedover i vannsøylen. Jo lavere synkehastigheten er, jo mindre er den relative økningen over et gitt dypintervall. Ved en viss omrøring som gir vertikal blanding vil derfor fine partikler med lav synkehastighet være ganske jevnt fordelt, mens grove partikler med høy synkehastighet vil bli konsentrert mot bunnen. Ved bunnen vil det være en balanse mellom avsetning på bunnen og oppvirvling av det som ligger på bunnen, og det vil bestemme likevektskonsentrasjonen i vannsøylen under kontinuerlig og langvarig omrøring. Partikler som synker raskere enn største vertikale vannbevegelse rettet oppover, vil som nevnt forsvinne helt fra vannfasen etter en viss tid med omrøring.

Vertikalprofilen for den totale partikkel-konsentrasjonen blir en kombinasjon (et integral) over alle partikkelfraksjonene med ulike synkehastigheter. Selv om hver partikkelfraksjon er fordelt etter en eksponentiell funksjon, vil ikke den kombinerte konsentrasjonsprofilen være det, men eksponentielt forløp kan være en brukbar tilnærming og kunne gi et estimat for dominerende forholdstall V/k . Hvis k under omrøring var kjent, kunne en da anslå dominerende synkehastighet (f.eks. nær median).

For utsynkingsfasen etter at omrøringen er skrudd av kunne det være naturlig å anta en eksponentiell reduksjon av turbulent diffusjon over tid, dvs. at blandingskoeffisienten er $k(t) = k_0 \exp(-f \cdot t)$.

Det gir ligningen:

$$\frac{\partial \gamma(\tilde{z}, t)}{\partial t} = -V \cdot \frac{\partial \gamma(\tilde{z}, t)}{\partial \tilde{z}} + k_0 \exp(-f \cdot t) \frac{\partial^2 \gamma(\tilde{z}, t)}{\partial \tilde{z}^2}$$

Ved å parametrisere kornstørrelsesfordelingen kunne data fra et utsynkingsforsøk i prinsippet brukes til å estimere k_0, f , samt parametrene i kurven $F(V)$ ved å tilpasse koeffisientene empirisk slik at beregning etter en slik modell stemmer best mulig med observerte konsentrasjoner. Det krever imidlertid en mye mer omfattende beregning enn det er rom for her, og det kan tenkes at data har for stor uregelmessig variasjon pga. måleusikkerheter og inhomogenitet til å gi brukbare estimater, selv om modellen skulle være realistisk.

Hvordan disse avvikene fra ideelle forutsetninger er tatt hensyn til ved de videre beregningene, blir beskrevet nærmere i kapittel 2.5.3 og 2.5.4.

2.5.3 Beregning av kumulativ fordeling av partikkelmasse mht. synkehastighet

Beregning av synkehastighet gjøres ut fra de forenklede forutsetningene i kapittel 2.5.1, men med én modifikasjon: For å ta hensyn til at det ved starten av utsynking allerede er en vertikal gradient i partikkelkonsentrasjonen, antas konsentrasjonsprofilen under omrøring å ligne en situasjon etter utsynking over et tidsrom t_0 fra en tenkt starttilstand med stillestående vannsøyle og helt vertikalt homogen fordeling av partikler og aggregater. Det er rimelig å gjøre samme justering av tid også for de senere konsentrasjonsprofilene, siden de representerer videre utvikling fra den målte startprofilen. Tidsjusteringen har lite å si for store t , men kan bidra til å unngå å overestimere synkehastighet.

Tiden justeres slik at data fra midtre og nedre deler av konsentrasjonsprofilen under omrøring (nominelt tidspunkt $t=0$) stemmer best mulig med data fra de nærmeste tidspunktene etterpå (2 og 5 minutter). Det gjøres ut fra en visuell bedømming i et plot av alle konsentrasjoner mot justert synkehastighet

$$V_{ik}^* = \tilde{z}_i / (t_k + t_0)$$

Både dyp og tidspunkt er beheftet med usikkerhet og systematiske feil:

- Pga. uttapping av vann endrer plasseringen av de faste prøvetappepunktene seg litt i forhold til toppen av vannsøylen i løpet av forsøket. Faste prøvepunkter er 10, 30, 50, 70 og 90 cm over bunnen av kolonnen. Dypet z ved beregning av synkehastighet er satt til reelt dyp fra overflaten rett før hver prøve. Når det tappes ut vann til prøvene, vil det antakelig trekkes inn vann radielt mot tapperøret fra alle retninger i området nærmest uttakspunktet, også fra lag ovenfor og nedenfor uttaket. Prøvene vil derfor representere en middelvei over et uspesifisert dypintervall rundt uttaksdypet.
- I noen tilfeller kan det være at partiklene ved gitt dyp og tid må ha passert gjennom noe av det volumet som tidligere er tappet ut lenger opp i vannsøylen, før dette ble tappet ut. Det gjør at noen av dypene kan være litt underestimert, og det vil dra i retning av for lave synkehastigheter.
- I hvert prøvesett tas det også en prøve ca. 1 cm under overflaten ved hjelp av sprøyte, i litt mindre høyde over bunn for hver runde ettersom overflaten synker når det tas prøver. Angitt dyp 1 cm for denne prøven er ikke eksakt, men en anslått verdi for gjennomsnittlig uttaksdyp.
- Hver prøve tappes ut over et visst tidsrom, og representerer altså en middelvei over både et dypintervall og et tidsintervall. Ved hver prøveomgang tas nederste prøve først, og så de andre prøvene i sekvens oppover mot overflaten. For forsøk 1 og 2 er det bare oppgitt nominelt (planlagt) tidspunkt for start av hvert prøvesett. Å ta et sett på 6 prøver tar ca. 2 minutter, og de nominelle tidspunktene er derfor for små, med størst relativ virkning for prøvetaking ved 2 og 5 minutter, og for prøvene nærmest overflaten, som ble tatt tilslutt i hver runde og dessuten tok lenger tid pga. det lavere trykket (den tynnere vannsøylen) over uttaket i øvre del av kolonnen. For prøvene lenger ned, som det legges mest vekt på, er forskjellen mindre, men det trekkes i retning av å overestimere synkehastigheten litt for den groveste partikkelfraksjonen. For utsynking av finfraksjonen, som kvantifiseres ut fra data etter en time eller mer, har det lite å si for resultatene. Ved forsøk 3, 4 og 5 ble reell tid for avslutning av hver prøve notert og brukt i beregningen; det gir mer nøyaktig beregning av synkehastighet, men kan trekke litt i retning av for lave verdier, dvs. en tendens til å ligge på den sikre siden og ikke overdrive hvor raskt avgangen sedimenteres.

Disse feilene og usikkerhetene i tidspunkt og dyp har antagelig liten betydning i forhold til usikkerhetene ellers, iallfall for tider ≥ 20 minutter og dyp ≥ 30 cm.

Ut fra drøftingen av avvik i kapittel 2.5.2 må det forventes at rest-turbulens og vertikal konveksjon i utsynkingsfasen kan gi noe for høye restkonsentrasjoner av fine fraksjoner nær toppen av vannsøylen, mens konsentrasjonene nær bunnen kan bli for lave pga. vertikal utjevning. For å få riktigst mulig resultater er det derfor valgt å legge hovedvektene på målingene midt i vannsøylen. For å få fram en kumulativ fordeling av partikkelmassen med hensyn til synkehastighet, plottes beregnet gjennomsnitt for 30, 50 og 70 cm dyp for hvert tidspunkt mot synkehastighet som er beregnet med dyp 50 cm dividert på justert tid. Det kan gi en utjevning av måleusikkerheter sammenlignet med å bruke bare 50 cm. Resultatet avviker stort sett ikke så mye fra målt verdi i 50 cm dyp. Eventuell tendens til systematisk avvik skulle, ut fra det som er sagt ovenfor om eksponentiell fordeling, bidra til å overestimere konsentrasjon ved 50 cm, og derved også overestimere andel med synkehastigheter under gitt grense. Derved skulle det dra resultatene i retning av å ligge på den sikre siden, dvs. ikke å overdrive hvor raskt avgangen synker ut.

2.5.4 Omregning til ekvivalente kornfordelingskurver for aggregert partikkelmasse

Synkehastighetene regnes om til ekvivalent partikkelstørrelse ut fra Stokes' lov, dvs. at de kumulative fordelingene av partikkelmasse mot synkehastighet regnes om til kornfordelingskurver med kumulativ andel av partikkelmasse mot ekvivalent diameter. Omregningen gjøres med viskositet for sjøvann ved 17,5 °C, som er den temperaturen forsøkene ble gjort ved, og med oppgitt massetetthet for avgangsmaterialet. De ekvivalente fordelingene viser altså hvilken størrelsesfordeling av uflokkulerte primærpartikler som ville ha samme utsynking som den flokkulerte partikkelmassen i forsøkene. Dette kan

sammenlignes med reell fordeling av uflokkulerte partikler for å vise den praktiske effekten av flokkuleringen.

Vi regner altså om den kumulative fordelingen av partikkelmasse som funksjon av utsynkingshastighet:

$F(V)$ = vektandel av partikkelmassen som har synkehastighet $< V$.

til en ekvivalent fordeling av størrelsene på partikkelaggregater, dvs.

$F(d)$ = vektandel av partikkelmasse i aggregater med diameter $< d$

Det gjøres ved å beregne effektiv aggregatdiameter d som funksjon av synkehastighet V ut fra Stokes' lov:

$$V = \frac{d^2(\rho_s - \rho_w)g}{18 \cdot \nu \cdot \rho_w} \quad \text{i invertert form: } d = \sqrt{V \frac{18 \cdot \nu \cdot \rho_w}{(\rho_s - \rho_w)g}}$$

hvor

ρ_w = massetetthet for omgivende vann = 1027 kg·m⁻³ (sjøvann)

ν = kinematisk viskositet

g = tyngdens akselerasjon = 9,81 m·s⁻²

ρ_s = massetetthet for partiklene

Omregningen gjøres med tidligere oppgitt massetetthet for partiklene ρ_s = 3450 kg·m⁻³ (Iversen et al. 2009), dvs. at kornfordelingen skal brukes i modellen som om den gjaldt massive malmpartikler. I virkeligheten vil aggregatene kunne ha lavere effektiv tetthet og være større enn beregnet her. Det skal ikke spille noen rolle i en modell hvor utsynkingen beskrives som uavhengig for hver partikkelstørrelse, så lenge kombinasjonen av massetetthet og partikkelstørrelsesfordeling gir riktig synkehastighetsfordeling.

Viskositeten er en funksjon av temperatur og saltholdighet. Ved de første fire forsøkene var saltholdigheten i kolonnen ca. 35, som er vanlig på 60 m dyp i Drøbaksundet, hvor sjøvannet ble hentet fra. Den lille restmengden av ferskvann i flokkulert avgang innvirker ikke vesentlig på det. I forsøk nr. 5 ble det tilsatt saltlake til ferskvannet i kolonnen i stedet for å bytte ut ferskvann med sjøvann. Saltholdigheten i kolonnen ble etterpå målt til 39,6. Temperaturen på vannet antas i alle forsøkene å ha vært ca. 17,5 °C.

Den kinematiske viskositeten avtar med økende temperatur, og øker noe med saltholdigheten. Detaljerte sammenhenger for dynamisk viskositet $\mu = \nu \cdot \rho_w$ er beskrevet i Sarqawy et al. (2010), og tilhørende tabeller i http://web.mit.edu/seawater/Seawater_Property_Tables.pdf viser variasjon i kinematisk viskositet direkte. På basis av tabellerte viskositetsverdier for temperatur 0, 10, 20 og 30 °C og saltholdighet 0, 10, 20, 30 og 40 kan det tilpasses en funksjon

$$\nu = \frac{1.789625 + 0.0010201 \cdot S^{1.16035}}{1 + 0.0350 \cdot T + 0.000201 \cdot T^2 - 0.000027 \cdot S \cdot T} \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

som beskriver data i tabellen innenfor et maksimalt relativt avvik på 0,2 %.² For forsøk 1-4 gir formelen viskositet 1,118·10⁻⁶ m²/s, mens den for forsøk 5 gir en litt høyere viskositet 1,125·10⁻⁶ m²/s. Forskjellen er helt uvesentlig, og vi bruker verdien 1,12·10⁻⁶ m²/s for alle forsøkene. I dypvannet i en fjord vil temperaturen være lavere; det kan tas hensyn til i en modell ved å bruke en høyere viskositet slik at det blir riktig utsynking hvis Stokes' lov brukes med de beregnede kornfordelingene.

² Tilpasningen er gjort ved minimering av summen av kvadratet av relativt avvik.

3. Resultater fra utsynkingstestene og estimert effektiv kornfordeling for utsynking av flokkulert avgang i sjøvann

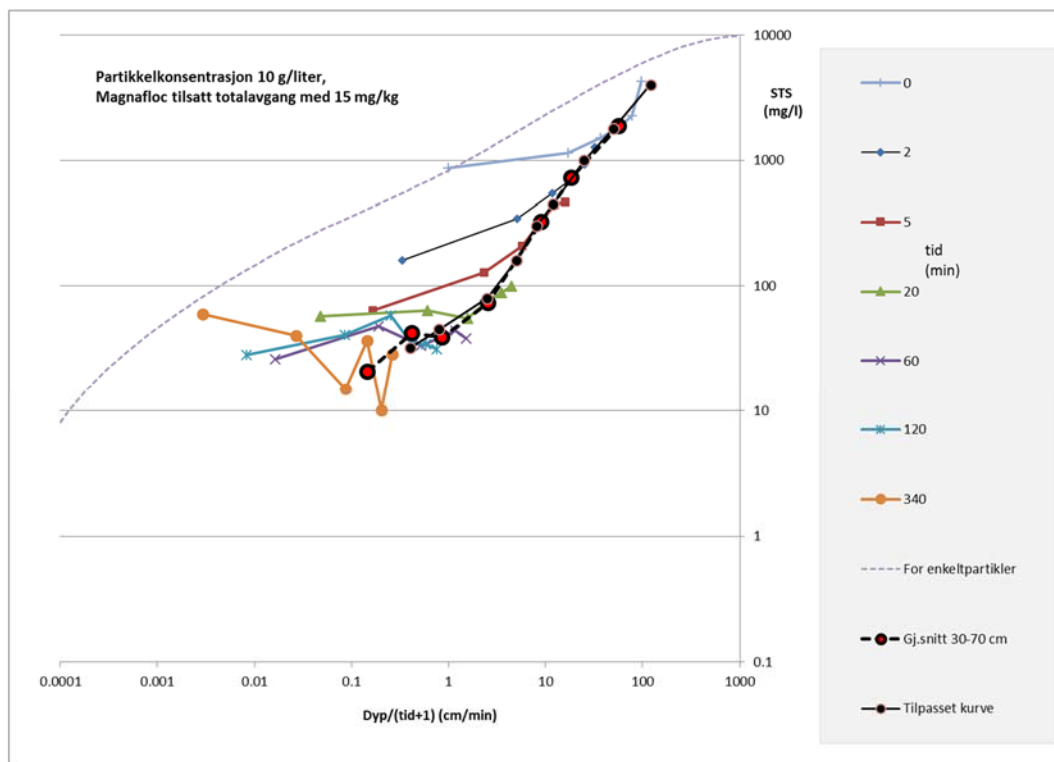
3.1 Fordelingskurver for synkehastighet

Resultat av de fem utsynkingsforsøkene er vist i Figur 1 til Figur 5. I alle figurene er målte konsentrasjoner vist mot forholdstall $V=z/(t+t_0)$, med en dypprofil for hvert uttak av prøver. Profilene er identifisert i figurforklaringen med en omtrentlig tidsangivelse omtrent midtveis i prøvetakingen, og prøvepunktene er markert; de ligger fra venstre mot høyre i økende dyp nedover fra overflaten. Justeringskonstanten t_0 er satt for hvert forsøk ut fra visuell justering slik at data for $t=0$ (under omrøring) i størst mulig grad faller sammen med den kurven $F(V)$ som data for de nærmeste etterfølgende tidspunkt (nominelt 2 og 5 eller 4 og 10 minutter). Konstanten t_0 er satt til 1 minutt for de to første forsøkene, 2 minutter for det tredje forsøket, og 6 minutter for forsøk 4 og 5. Denne justeringen vil påvirke alle data, og bidra til å trekke resultatet i retning av å overestimere avgangsfraksjon med synkehastigheter under en gitt verdi, altså trekke kurvene noe til venstre, i forhold til om tiden ikke var justert. Dette har svært liten virkning for fordeling av de fineste fraksjonene, som bygger på resultatene fra de siste tidspunktene i forsøk med lang varighet.

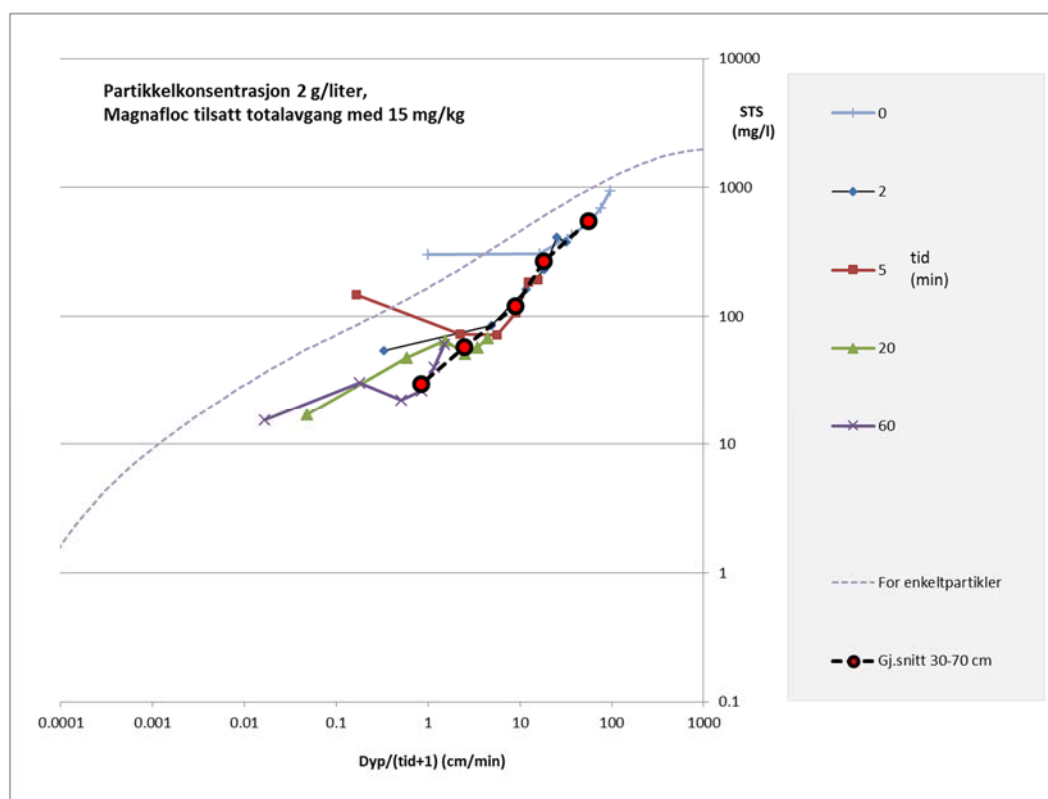
Begrunnelsen for justeringen av tid er som nevnt ovenfor at konsentrasjonen ved omrøring ($t=0$) ikke var homogen, men økte nedover i kolonnen (mot høyre i hver figur). Økningen forklares av at også denne profilen er preget av utsynking av partikler, men motvirket av homogenisering pga. omrøringen i kolonnen. Justeringskonstanten t_0 for tid kan betraktes som en måte å ta hensyn til dette.

De røde punktene, som er bundet sammen med svart stiplet linje, viser beregnede gjennomsnitt for 30, 50 og 70 cm dyp for hver prøverunde (hver dypprofil av konsentrasjoner), plottet mot utsynkingshastighet beregnet som forholdet mellom sedimenteringsdyp 50 cm og justert tid som vist i kapittel 2.5.3. Denne kurven representerer et rimelig anslag for en kumulativ fordeling, dvs. hvor stor andel av flokkulert partikkelmasse som synker langsommere enn angitt synkehastighet, og bør kunne brukes til å lage en tilnærmet ekvivalent kornfordelingskurve. For forsøk 1 gir dette ikke en monotont synkende andel med avtagende synkehastighet i nedre del av kurven, og det er derfor tilpasset en kurve, som stort sett faller sammen med de direkte beregnede punktene, men med nedre del justert visuelt for å jevne ut fluktuasjonen i de beregnede punkter. Kurven er også trukket et stykke videre oppover fra det øverste røde punktet, ut fra visuell sammenligning med profilen for omrøring (nominell $t=0$). Den justerte kurven er vist som *Tilpasset kurve* i Figur 1.

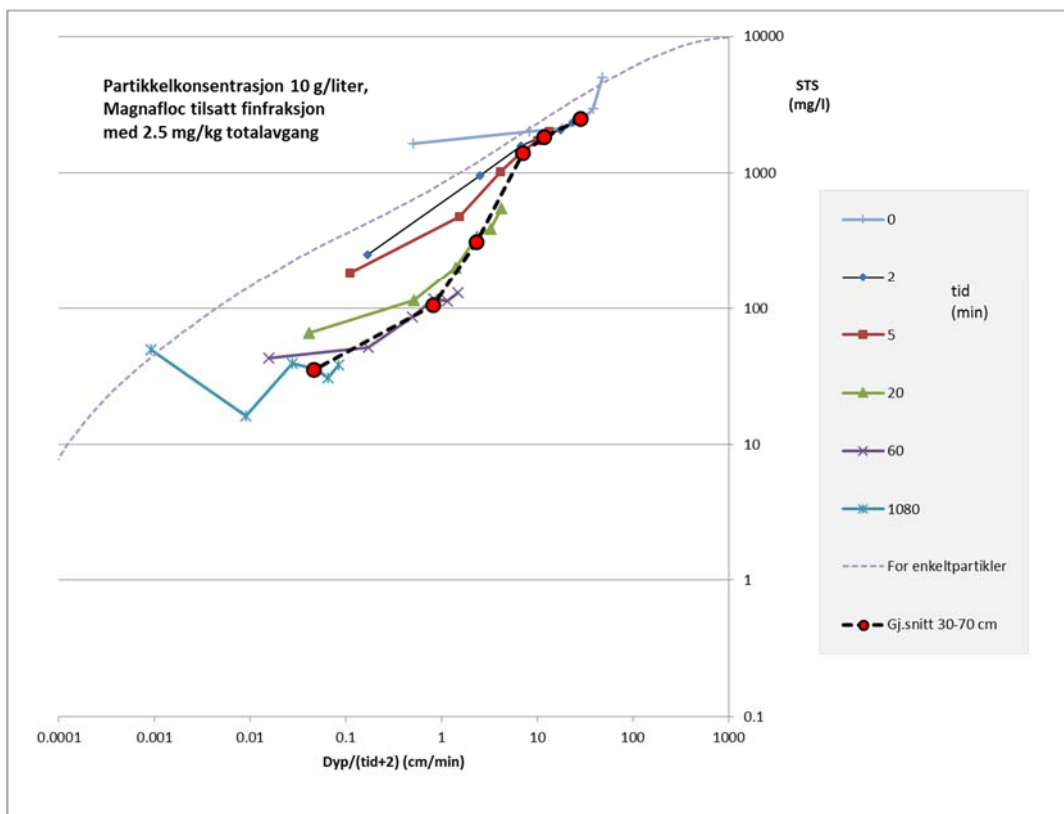
En stiplet kurve som viser synkehastighet ut fra kornstørrelsesfordelingen for enkeltpartikler er lagt inn for sammenligning i alle figurene; den er beregnet med Stokes' lov ut fra kornfordelingskurven, ved forsøkstemperatur 17,5 °C.



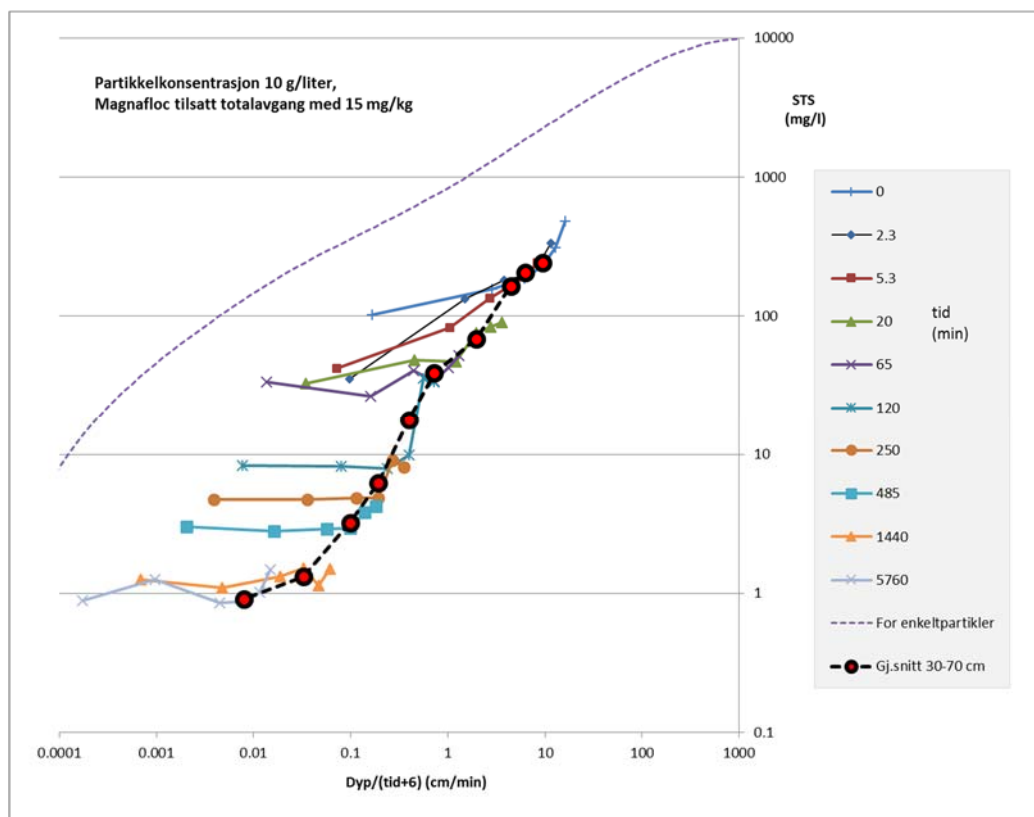
Figur 1. Resultat av utsynkingsforsøk nr. 1. Se teksten for detaljert forklaring



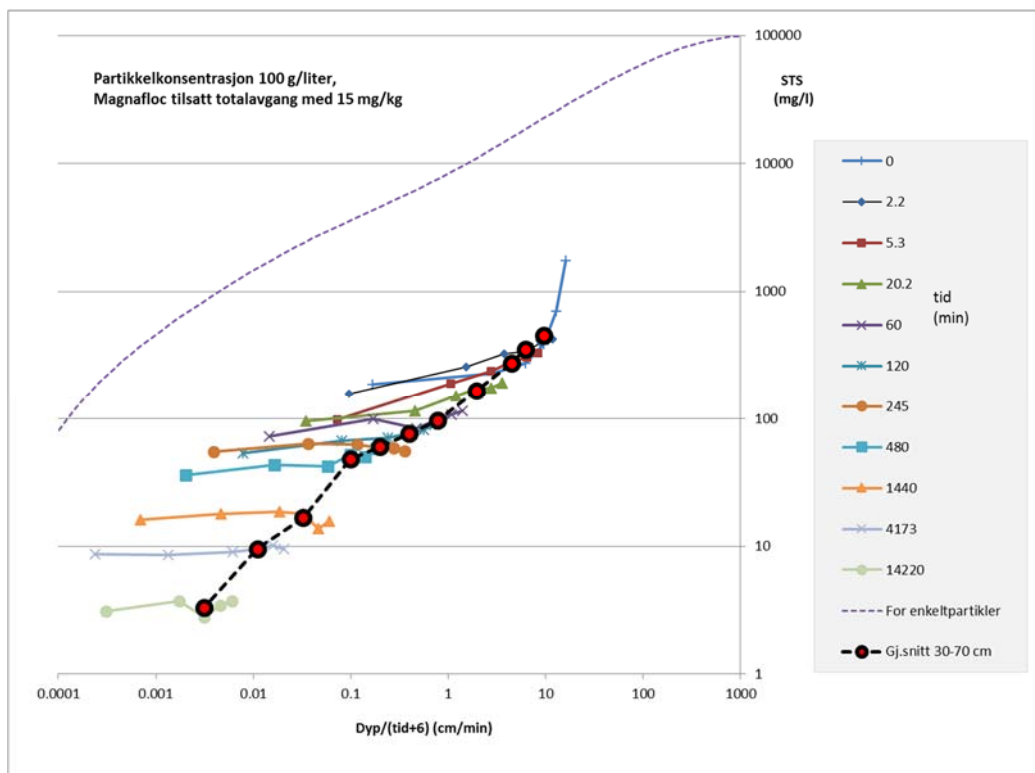
Figur 2. Resultat av utsynkingsforsøk nr. 2. Se teksten for detaljert forklaring.



Figur 3. Resultat av utsynkingsforsøk nr. 3. Se teksten for detaljert forklaring.



Figur 4. Resultat av utsynkingsforsøk nr. 4. Se teksten for detaljert forklaring.



Figur 5. Resultat av utsynkingsforsøk nr. 5. Se teksten for detaljert forklaring.

Figurene ovenfor viser målte konsentrasjoner i utsynkingskolonnen, dvs. hvor mye av den partikkelmengden som ble tilsatt kolonnen som var igjen ved ulike tidspunkter i ulike dyp. I forsøk 1 til 4 ble ikke absolutt hele partikkelmengden tilsatt kolonnen; en liten del av finfraksjonen fulgte med klarfasen av ferskvann som ble dekantert fra målesylindren etter tilsetning av Magnafloc, flokkulering og 1 times sedimentering. Innholdet av klarfasen ble altså ikke med i utsynkingsforsøket, og dette utgjør en mulig feilkilde, slik at målt sluttkonsentrasjon i forsøkene er for liten i forhold til hva den ville vært om all finfraksjon var med. Detaljene mht. betydningen av klarfasen er vist i Tabell 2. Den øverste halvdel av tabellen gjengir noen oppsummerende data og resultater for utsynkingsforsøkene, bl.a. konsentrasjon av partikler i kolonnen, mens den nedre halvdel beskriver partikkelinnholdet i klarfasen og viser hvordan det maksimalt kunne endret konsentrasjonene i kolonnen hvis det ble fordelt der uten noen reduksjon pga. utsynking.

Hvor stor betydning fjerningen av klarfasen faktisk hadde på resultatet er usikkert; det kan være at det meste av det som ble fjernet med klarfasen også ville ha sunket ut i løpet av forsøket i kolonnen, spesielt ved de mest langvarige forsøkene. Den partikkelmengden som fulgte med klarfasen kan anses som en øvre grense for en mulig feilkilde. I alle forsøkene var den en liten del av den totale partikkelmengden, men i forsøk 3 var den klart størst (relativt sett 50-140 x større). I forsøk 1 og 2 var den også uvesentlig sammenlignet med den restmengden som hang igjen suspendert i utsynkingskolonnen ved slutten av forsøket (etter hhv. ca. 5,5 t og 1 t), slik at det ikke er noen vesentlig feilkilde. I forsøk 3 og 4, hvor siste prøveuttak skjedde mye senere (etter hhv. 18t og 96 t) var mengden som ble tatt ut med klarfasen hhv. 3,5 og 1,5 ganger større enn restmengden i vannsøylen i kolonnen, og da kan det tenkes å utgjøre en vesentlig feilkilde for utsynking av finfraksjonen i disse forsøkene. I forsøk 5 ble det ikke helt av noe ferskvann; i stedet ble det tilsatt saltlake for å få til overgang til sjøvann, slik at hele partikkelmengden var med i forsøket.

Tabell 2. Noen hovedresultater fra forsøkene

Total avgangsmasse og målt i utsynkingskolonnen

| Forsøk nr. | Varighet | Total avgangsmasse | | Målt partikkel-konsentrasjon i kolonnen (gjennomsnitt 10-90 cm) | | |
|------------|----------|--------------------|------------------------------|--|------------|-------|
| | | Mengde | Som kons. i 30 liter vann | Start | ca. 1 time | Slutt |
| | minutter | (g) | (mg/L) | mg/L | mg/L | mg/L |
| 1 | 340 | 300 | 10 000 | 2 204 | 40 | 26 |
| 2 | 60 | 60 | 2 000 | 582 | 36 | 36 |
| 3 | 1 080 | 300 | 10 000 | 2 888 | 100 | 32 |
| 4 | 5 760 | 300 | 10 000 | 274 | 39 | 1.09 |
| 5 | 14 220 | 3 000 | 100 000 | 666 | 101 | 3.35 |

Klarfase dekantert før utsynkingstest (bare forsøk 1-4)

| Forsøk nr. | Vann- | Konsent- | Mengde | | Partikkelinnhold | | | |
|------------|-------|----------|--------|----------------------------------|---|------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| | volum | | | | Som konsentrasjon fordelt i 30 liter vann | | | |
| | L | mg/L | mg | % av total avgangs- mengde | mg/L | % av start- kons | % av kons. ved ca. 1 time | % av slutt- kons. |
| 1 | 1,8 | 14 | 25,2 | 0,008 % | 0,84 | 0,04 % | 2,1 % | 3,2 % |
| 2 | 0,35 | 38 | 13,3 | 0,022 % | 0,44 | 0,08 % | 1,2 % | 1,2 % |
| 3 | 1,76 | 1886 | 3319 | 1,11 % | 111 | 3,8 % | 111 % | 346 % |
| 4 | 1,8 | 27 | 48,6 | 0,016 % | 1,62 | 0,6 % | 4,2 % | 149 % |

3.2 Oppsummering av resultatene for kumulative fordelinger mht. synkehastighet og ekvivalent kornstørrelse.

Resultatet av forsøkene er oppsummert i etterfølgende tabeller og figurer. Tabell 3 er basert på gjennomsnittskonsentrasjonene for 30-70 cm kombinert med synkehastighet som beskrevet i kapittel 2.5.3 med omregning til kornfordeling som beskrevet i kapittel 2.5.4. Tabell 4 viser punktene på en tilpasset kurve for forsøk 1 som beskrevet på side 17 og vist i Figur 1, hvor forløpet er jevnet ut slik at det blir en monotont økende kumulativ fordeling for finfraksjon, og skjønnsmessig forlenget litt i retning store synkehastigheter. Resultatene er vist grafisk i Figur 6 (Konsentrasjon mot synkehastighet) og Figur 7 (Partikkelfraksjon mot ekvivalent diameter). Begge figurene viser den tilpassede kurven for forsøk 1, inkludert forlengelsen mot større synkehastigheter og ekvivalente partikkeldiameterer.

Konsentrasjonene er regnet om til fraksjon av totalt tilsatt partikkelkonsentrasjon (2, 10 eller 100 g/liter), dvs. at basis for partikkelfraksjonene inkluderer det som synker ut under omrøring i forsøkene. Hver linje i Tabell 3 viser hvor stor andel av partikler (*Kumulativ partikkelfraksjon*) som antas å synke langsommere enn angitt hastighet, dvs. som har ekvivalent diameter mindre enn angitt grense. For de første tidspunktene opp til 5-10 minutter er synkehastighet beregnet ut fra en spesielt usikker tidsangivelse, siden prøvetakingen i hver runde typisk tok ca. 2,5 minutter, og det er lagt til en skjønnsmessig tidsjustering for å tilpasse profilen under omrøring til etterfølgende data, ulikt for hvert forsøk. En skal derfor ikke legge for stor vekt på horisontal beliggenhet av punktene i den øverste delen av kurvene, dvs. for synkehastigheter 2 – 5 cm/minutt og større. For lavere synkehastigheter er tidsangivelsen mer nøyaktig, men tidsjusteringen vil bidra til å trekke resultatene i retning av å underestimere synkehastighet og overestimere andel av partikkelmasse med ekvivalent diameter under en gitt størrelse. Legg merke til at for forsøk 1 er det presentert en tilpasset kurve som ikke er helt identisk med den direkte beregnede – den er også forlenget mot store aggregater ut fra profilen under omrøring (se Figur 1). For de andre forsøkene er bare beregnede punkter midt i kolonnen benyttet.

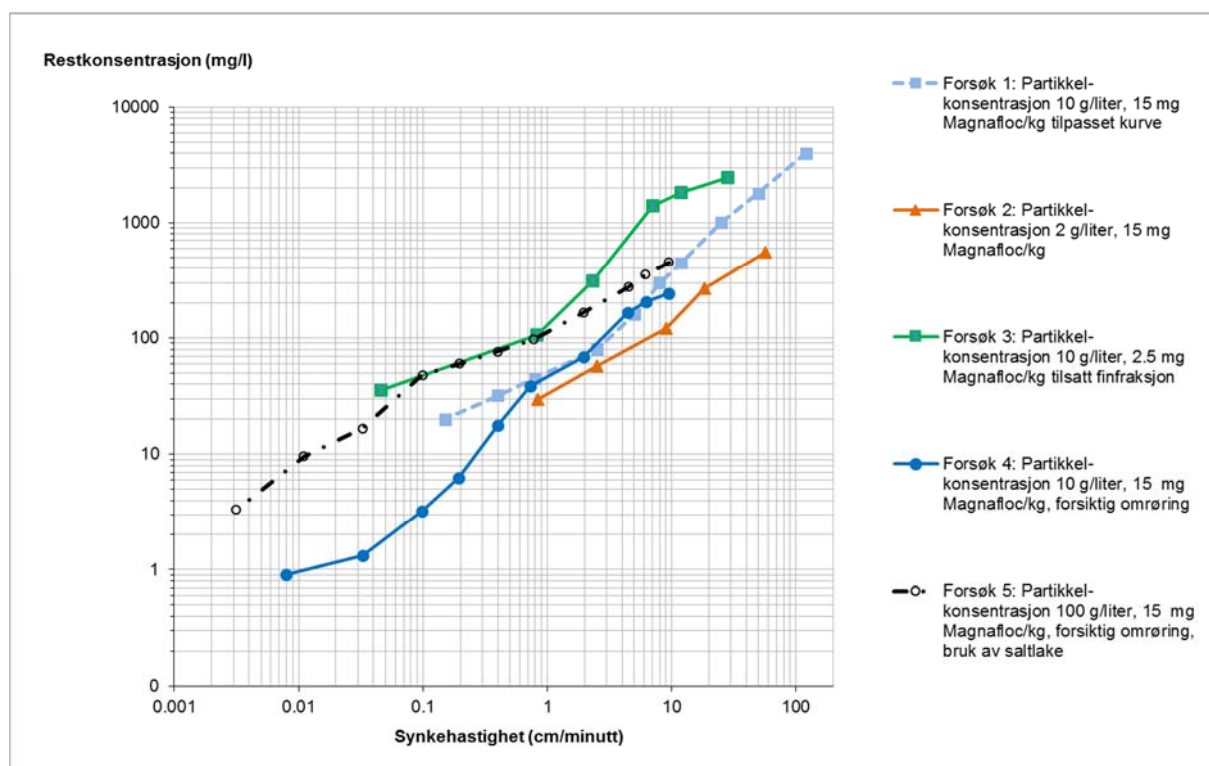
Synkehastighetene gjelder for sjøvann ved temperatur 17,5 °C, og vil være lavere i kaldere vann som har høyere viskositet. Beregnet kornfordeling skal brukes med partikkeltetthet 3450 kg/m³ for å gi utsynking som i forsøkene når Stokes' lov benyttes, selv om det i realiteten kan være at aggregatene har lavere effektiv tetthet fordi de er mindre kompakte; de vil i så fall være tilsvarende større.

Tabell 3. Kumulativ fordeling av partikkelmasse på synkehastighet og ekvivalent partikkeldiameter etter tilsetning av Magnafloc, basert på utsynkingstester som beskrevet i teksten, med konsentrasjoner som gjennomsnitt av målinger i 30, 50 og 70 cm. Tabellen viser tallverdier med større nøyaktighet enn reell usikkerhet skulle tilsi.

| Spesifikasjon av startkonsentrasjoner | Kons. (mg/l) | Kumulativ partikkel-fraksjon | Ca. tid (minutter) | Synke-hastighet (z= 50 cm og justert tid) | | Ekvivalent diameter (µm) |
|---|--------------|------------------------------|--------------------|---|---------|--------------------------|
| | | | | cm/minutt | m/s | |
| Forsøk 1: Partikkel-konsentrasjon 10 g/liter, 15 mg Magnafloc/kg <i>Direkte beregnede tall, ikke-monoton for de to nest siste tidspunktene)</i> | 1864 | 0,19 | 0 | 57 | 9,5E-03 | 91 |
| | 727 | 0,073 | 2 | 18,5 | 3,1E-03 | 52 |
| | 326 | 0,033 | 5 | 9,1 | 1,5E-03 | 36 |
| | 73 | 0,0073 | 20 | 2,5 | 4,2E-04 | 19 |
| | 39 | 0,0039 | 60 | 0,85 | 1,4E-04 | 11 |
| | 42 | 0,0042 | 120 | 0,42 | 7,0E-05 | 7,8 |
| | 21 | 0,0021 | 340 | 0,15 | 2,4E-05 | 4,6 |
| Forsøk 2: Partikkel-konsentrasjon 2 g/liter, 15 mg Magnafloc/kg | 551 | 0,276 | 0 | 56,4 | 9,4E-03 | 90 |
| | 268 | 0,134 | 2 | 18,3 | 3,1E-03 | 52 |
| | 120 | 0,06 | 5 | 9 | 1,5E-03 | 36 |
| | 58 | 0,029 | 20 | 2,5 | 4,2E-04 | 19 |
| | 30 | 0,015 | 60 | 0,84 | 1,4E-04 | 11 |
| Forsøk 3: Partikkel-konsentrasjon 10 g/liter, 2,5 mg Magnafloc/kg tilsatt bare finfraksjonen (<63 µm) | 2476 | 0,25 | 0 | 28,2 | 4,7E-03 | 64 |
| | 1833 | 0,18 | 2,8 | 11,9 | 2,0E-03 | 42 |
| | 1395 | 0,14 | 5,8 | 7,1 | 1,2E-03 | 32 |
| | 310 | 0,031 | 21 | 2,32 | 3,9E-04 | 18 |
| | 106 | 0,011 | 61 | 0,82 | 1,4E-04 | 11 |
| | 35 | 0,0035 | 1081 | 0,05 | 7,7E-06 | 2,6 |
| Forsøk 4: Partikkel-konsentrasjon 10 g/liter, 15 mg Magnafloc/kg, med sekundær flokkulering i sjøvann og med forsiktig omrøring | 243 | 0,024 | 0 | 9,5 | 1,6E-03 | 37 |
| | 206 | 0,021 | 3 | 6,2 | 1,0E-03 | 30 |
| | 165 | 0,016 | 6,3 | 4,5 | 7,4E-04 | 25 |
| | 69 | 0,0069 | 21 | 2,0 | 3,3E-04 | 17 |
| | 39 | 0,0039 | 66 | 0,73 | 1,2E-04 | 10 |
| | 18 | 0,0018 | 122 | 0,4 | 6,6E-05 | 7,6 |
| | 6 | 0,00063 | 251 | 0,19 | 3,2E-05 | 5,3 |
| | 3,2 | 0,00032 | 486 | 0,1 | 1,6E-05 | 3,8 |
| | 1,3 | 0,00013 | 1441 | 0,033 | 5,4E-06 | 2,2 |
| | 0,9 | 0,00009 | 5761 | 0,008 | 1,3E-06 | 1,1 |
| Forsøk 5: Partikkel-konsentrasjon 100 g/liter, 15 mg Magnafloc/kg, med tilsetning av saltlake for sekundær flokkulering i sjøvann og med forsiktig omrøring | 454 | 0,0045 | 0 | 9,5 | 1,6E-03 | 37 |
| | 355 | 0,0036 | 3,3 | 6,2 | 1,0E-03 | 30 |
| | 276 | 0,0028 | 6,4 | 4,5 | 7,5E-04 | 26 |
| | 167 | 0,0017 | 21,4 | 2,0 | 3,3E-04 | 17 |
| | 97 | 0,00097 | 61,5 | 0,77 | 1,3E-04 | 11 |
| | 76 | 0,00076 | 121 | 0,4 | 6,7E-05 | 7,6 |
| | 60 | 0,0006 | 246 | 0,2 | 3,3E-05 | 5,4 |
| | 48 | 0,00048 | 482 | 0,1 | 1,7E-05 | 3,8 |
| | 17 | 0,00017 | 1442 | 0,033 | 5,4E-06 | 2,2 |
| | 10 | 0,000096 | 4174 | 0,011 | 1,8E-06 | 1,3 |
| | 3,3 | 0,000033 | 14220 | 0,003 | 5,3E-07 | 0,68 |

Tabell 4. Kumulativ fordeling av partikkelmasse på synkehastighet og ekvivalent partikkeldiameter fra forsøk 1, tilpasset kurve ut fra konsentrasjoner som gjennomsnitt av målinger i 30, 50 og 70 cm. Kurven er forlenget noe mot store aggregater i forhold til de direkte beregnede verdiene i Tabell 3, og kurven er jevnet ut for finfraksjonen for å gi en monotont økende kumulativ fordelingskurve. Tabellen viser tallverdier med større nøyaktighet enn reell usikkerhet skulle tilsi.

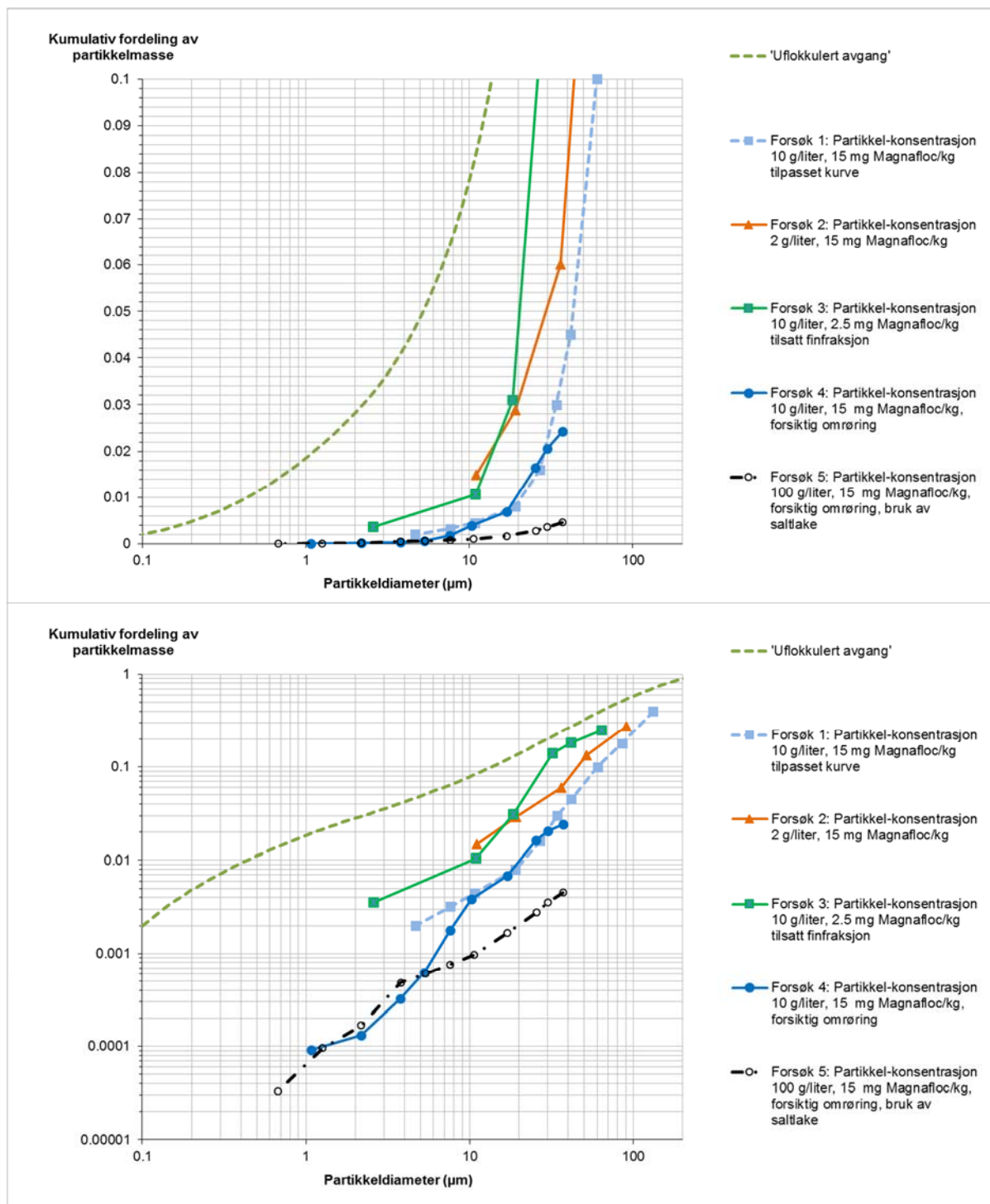
| Spesifikasjon av startkonsentrasjoner | Kons. (mg/l) | Kumulativ partikkel-fraksjon | Ca. tid (minutter) | Synke-hastighet (z= 50 cm og justert tid) | | Ekvivalent diameter (µm) |
|---|--------------|------------------------------|--------------------|---|---------|--------------------------|
| | | | | cm/minutt | m/s | |
| Forsøk 1: Partikkel-konsentrasjon 10 g/liter, 15 mg Magnafloc/kg <i>Tilpasset kurve, ikke reelle målte konsentrasjoner</i> | 4 000 | 0,40 | 0,4 | 120 | 2,0E-02 | 132 |
| | 1 800 | 0,18 | 1 | 50 | 8,3E-03 | 85 |
| | 1 000 | 0,10 | 2 | 25 | 4,2E-03 | 60 |
| | 450 | 0,045 | 4,2 | 12 | 2,0E-03 | 42 |
| | 300 | 0,030 | 6,3 | 8 | 1,3E-03 | 34 |
| | 160 | 0,016 | 10 | 5 | 8,3E-04 | 27 |
| | 80 | 0,0080 | 20 | 2,5 | 4,2E-04 | 19 |
| | 45 | 0,0045 | 63 | 0,8 | 1,3E-04 | 11 |
| | 32 | 0,0032 | 125 | 0,4 | 6,7E-05 | 7,6 |
| | 20 | 0,0020 | 333 | 0,2 | 2,5E-05 | 4,7 |



Figur 6. Restkonsentrasjon midt i utsynkingskolonnen (gj.snitt av 30, 50 og 70 cm dyp) vist mot synkehastighet beregnet som $z/(t+t_0)$ med $z=50$ cm, t =tid fra opphør av omrøring og t_0 en justeringskonstant for tilpassing av målinger under omrøring (se side 14). For forsøk 1 er det brukt en tilpasset kurven som beskrevet på side 18. Merk at grafen har logaritmisk skala på begge akser for å få fram forløpet for lave synkehastigheter mer tydelig.

I tillegg til forsøksresultatene inneholder Figur 7 også kornfordelingskurven for uflokkulert avgang som sammenligningsgrunnlag. Det fremgår av nedre del av denne figuren at kurvene for flokkulert avgang har en mye mindre andel av partikkelmassen i området $<100\text{ }\mu\text{m}$ enn fordelingen for uflokkulert avgang, og at den prosentvise reduksjonen av partikkelfraksjon under en gitt ekvivalent diameter er større jo mindre diameter som betraktes. For forsøk 1 er partikkelfraksjonen $<100\text{ }\mu\text{m}$ redusert til ca. 40 % av fraksjonen for uflokkulert avgang, mens fraksjonen $<30\text{ }\mu\text{m}$ er redusert til 10 % og fraksjonen under $10\text{ }\mu\text{m}$ til bare 5 % av tilsvarende fraksjoner for uflokkulert avgang. Tilsvarende trender ses i større eller mindre grad for alle forsøkene.

Forsøkene gir ikke informasjon om fordeling av effektiv partikkelstørrelse for den delen av flokkulert masse som synker ut raskest. I forsøk 1, 2 og 3 ble 20-30 % av total avgangsmasse bevart suspendert i vannsøylen under omrøring, resten sank ut allerede da. I forsøk 4 og 5, med mer forsiktig omrøring, var det bare hhv. 2,7 % og 0,7 % av partikkelmassen som ble effektivt suspendert i vannsøylen – resten sank ut.



Figur 7. Kumulative kornfordelingskurver som skal tilsvare målt utsynking av flokkulert avgang i utsynkingsforsøk når Stokes' lov brukes med massetetthet 3450 kg/m^3 . Kurven for uflokkulert avgang (enkeltpartikler) er tatt med for sammenligningens skyld. Begge grafene har logaritmisk skala på horisontal akse. Den øverste grafen har lineær skala på vertikal akse, mens den nederste grafen har logaritmisk skala på begge akser for å vise restmengdene av finfraksjoner bedre.

4. Diskusjon

De fem utsynkingsforsøkene er alle gjort med litt forskjellig fremgangsmåte. Det skyldes delvis ønsket om å kartlegge best mulig hva som kan påvirke aggregering og utsynkingen, og delvis erfaringer som ble gjort underveis. Det er altså ikke gjort noen replikate forsøk, og resultatene gir derfor ikke grunnlag for å skille systematiske forskjeller pga. ulik fremgangsmåte fra ukontrollerbare avvik fra forventet gjennomsnittlig resultat ved flere repetisjoner av en gitt fremgangsmåte (dvs. det som vanligvis kalles «tilfeldige» feil). Ved tolkningen av resultatene må dette tas i betraktning.

4.1 Usikkerhet i analysen av suspendert stoff

I forsøk 1 og 3 viser resultatene fra de siste tidspunktene stor uregelmessig variasjon mellom dypene, og det tyder på ganske stor usikkerhet i konsentrasjonen. I forsøk 1 varierer konsentrasjonene mellom 10 og 59 mg/liter ved siste måling etter 340 minutter (knappt 6 timer). I forsøk 3 ble det gjort en siste måling etter 1080 minutter (18 timer); da varierte konsentrasjonen mellom 16 og 50 mg/liter. I begge forsøkene svingte målte konsentrasjoner ved slutten av forsøkene frem og tilbake som funksjon av dyp, uten noen klar vertikal trend. De tre første forsøkene endte alle med konsentrasjoner omkring 30 mg/liter, selv om både fremgangsmåte og varighet varierte. Dette kan tyde på at målingene av de lave konsentrasjonene i de første forsøkene har vært påvirket av målefeil, og at det kanskje har dominert sluttresultatene. For forsøk 1 og 3 var standardavviket for målingene i de faste målepunktene hhv. 13 og 9 mg/liter. I forsøk 2 var standardavviket 15 mg/liter, men en del av dette kan ha vært en reell vertikal trend (se Figur 2).

I de tre første forsøkene ble STS benyttet som metode for bestemmelse av suspendert stoff (SS) i alle prøvene. Her benyttes det et glassfiberfilter (GF/F) til å fange opp det suspenderte materialet. I henhold til prosedyren skal filteret vaskes med 100 ml destillert vann etter filtrering av sjøvannsprøver for å vaske ut overskuddssalt, noe som ble gjort. Selv om mengden destillert vann brukt til utvasking av salt ble økt til ca. 200 ml i forsøk 2 og 3, var den observerte måleusikkerheten i analysen fremdeles uakseptabel stor for SS-verdier <ca. 50 mg/l. I forsøk 4 og 5 ble derfor SS i prøvene der SS-verdien ble antatt å være i størrelsesorden 50 mg/l eller lavere bestemt som TSM, der måleområdet for en 50 ml prøve går ned til ca. 0,1 mg/l (se beskrivelse i kapittel 2.4). Disse forsøkene varte også mye lenger, og sluttkonsentrasjonene her var hhv. ca. 1 og 3 mg/liter, med mye mindre relativ fluktuasjon med dypet, og med en klarere fortsatt nedgang gjennom hele forsøket. Det foreligger ikke andre data som kan tallfeste hvor usikre måleverdiene for SS i de tre første forsøkene er.

Algevekst i sjøvannskolonnen vil i prinsippet kunne bidra med tillegg av partikulært materiale som forskyver resultatet i retning av for høye konsentrasjoner. Laben hvor forsøkskolonnen sto var bare opplyst under aktive arbeidsøkter, og sto ellers mørk, slik at algeveksten bør være sterkt begrenset. Det ble brukt sjøvann fra 60 m dyp, hvor næringssalter tilsier N-begrensning, med typisk nitrat-konsentrasjon 140 µg/l. Det tilsier en mulig algebiomasse på 1-2 mg/l hvis alt næringssalt ble utnyttet til algevekst. Det er derfor ikke helt utelukket at noe algevekst kan ha hatt en viss betydning i retning av for høye partikkel-konsentrasjoner helt i slutfasen av de to siste forsøkene, da partikkelkonsentrasjonen kom ned i samme størrelse, men ut fra lysforholdene er det lite trolig at det har betydd noe vesentlig. Måling av gløderest på filtrene for å bestemme en eventuell økning i organisk stoff kunne i prinsippet ha gitt en indikasjon på om det hadde foregått noen algevekst under forsøkene, men filtrene som benyttes til TSM-analysen er ikke egnet til dette formål. Algevekst hadde sannsynligvis minimal betydning i de tre første forsøkene, ikke minst på grunn av den store usikkerheten i SS-verdiene i prøvene med lavest partikkelinnhold i de forsøkene.

4.2 Betydningen av omrøringshastighet, avgangskonsentrasjon, sjøvannsflokkulering og samlet utsynkingstid for tolkningen av fordelingen av utsynkingshastighet i den flokkulerte avgangen

Ingen av de fem utsynkingsforsøkene ble gjennomført under helt like forhold (jfr. Tabell 1 i kapittel 2.1). Selv om doseringen av Magnafloc var den samme i forsøk 1, 2, 4 og 5, ble det benyttet ulike avgangskonsentrasjoner og omrøringshastigheter i utsynkingskolonnen, innblanding av flokkulert avgang i sjøvann ble gjort noe ulikt og forsøksperiodens lengde varierte mellom forsøkene. Her diskuteres hvordan disse faktorene sannsynligvis har påvirket utsynkingen av den flokkulerte avgangen og hvordan dette igjen påvirker tolkningen av fordelingen av utsynkingshastighet i den flokkulerte avgangen.

Forsøkene gir et bilde av hvordan den flokkulerte partikkelmassen fordeler seg over et synkehastighetsintervall. Den øvre grensen bestemmes av hvor godt omrøringen motvirker utsynking, som beskrevet i kapittel 2.5.2. Den groveste fraksjonen synker ut under omrøring, og startkonsentrasjonen vil være dominert av aggregater som synker langsommere enn en øvre grense. På grunn av avvik fra ideelle forutsetninger, og usikker justering av effektiv synketid, er den øvre grensen for synkehastighet for den gjenværende fraksjonen bestemt med betydelig usikkerhet. Faktorer som påvirker partikkellkonsentrasjonen ved starten av utsynkingsforsøket og videre utsynkingshastighet diskuteres nærmere i kapittel 4.2.1.

Den nedre grensen for synkehastighetsintervallet bestemmes av forsøkets varighet. Restinnholdet ved slutten av forsøket vil naturlig være dominert av den minste partikkelfraksjonen i den flokkulerte avgangen, dvs. aggregater med synkehastigheter så lave at de ikke synker ut i løpet av forsøkens varighet. Den øvre grensen for synkehastigheter for gjenværende fraksjon i midtre del av kolonnen ved slutten av forsøket er beregnet som 50 cm dividert med synketiden (varigheten). Dette er samtidig en nedre grense for det synkehastighetsintervallet forsøket kan beskrive fordelingen over (se kapittel 2.5.3)³. Forsøket kan ikke si noe om hvordan restfraksjonen er fordelt over lavere synkehastigheter. Faktorer som påvirker restinnholdet ved slutt er diskutert nærmere i kapittel 4.2.2.

4.2.1 Betydningen for konsentrasjonen av avgangspartikler ved start av utsynkingsforsøket og videre utsynkingshastighet

Omrøringshastigheten

Omrøringen i utsynkingskolonnen kan være med på å bygge opp de dannede fnokkene videre eller den kan bidra til å knuse dem. Flokkuleringseffektiviteten (dvs. graden av aggregering av små avgangspartikler til fnokker) er avhengig av den turbulente hastighetsgradienten under omrøringen (den såkalte G-verdien) og hvor lenge det blir rørt. G-verdien er gitt av hvor mye energi som tilføres vannet, som igjen er bestemt av omrøringshastigheten og røreverkets geometri, og den er omvendt proporsjonal med den (dynamiske) viskositeten (eller seighet) til sjøvannet med avgangen. Økende G-verdier gir gjerne sterkere, men også mindre fnokker med større massetetthet, opp til et punkt der skjærkreftene blir for store og kreftene som binder fnokkene sammen brytes. Når avgangsfnokkene er bundet sammen med en flokkulant, vil de normalt tåle høyere G-verdier. Det ble ikke forsøkt å optimalisere denne G-verdien i disse forsøkene, men i de tre første utsynkingsforsøkene ble det benyttet en omrøringshastighet (150 rpm) som i utgangspunktet var et kompromiss mellom å holde en rimelig stor andel av avgangen relativt homogent distribuert i hele vannsøylen når forsøket ble startet og å hindre stor fnokk-knusing under omrøringen.

³ Det vil være en gradvis overgang, dvs. at en større eller mindre andel av fnokker med gitt synkehastighet vil være igjen i vannmassen avhengig av om grensen som defineres av forsøkets varighet ligger over eller under fnokkenes synkehastighet.

I de tre første forsøkene ble 20-30 % av den overførte avgangen funnet igjen i vannsøylen ved slutten av omrøringsperioden, men også med en klar økende SS-gradient gjennom hele kolonnen ned mot bunnen, som beskrevet teoretisk i kapittel 2.5.2.

Det ble spekulert i om den noe høye omrøringshastigheten på 150 rpm kunne hatt betydning for resultatet av forsøk 1-3 ved at fnokker ble knust under omrøringen. I forsøk 4 og 5 ble derfor omrøringshastigheten redusert helt ned til 30 rpm, samtidig som rotorbladene i røreverket ble økt i størrelse og skråstilt for å øke den vertikale omblendingen.

Resultatet av disse endringene var at en vesentlig lavere andel av avgangen ble funnet igjen i søylen ved starten av utsynkingsforsøkene, hhv. 2,7 % og 0,7 %, altså bare hhv. 1/10 og 1/30 av det som ble suspendert i forsøk 1-3. Det kan tenkes at dette delvis skyldes sekundær flokkulering i sjøvann, men forskjellen er også rimelig ut fra reduksjonen i omrøringshastighet.

I forsøk 1 og 4 ble det benyttet samme avgangskonsentrasjon (10 g/l), men omrøringshastigheten var altså forskjellig. I Figur 6 og Figur 7 sammenfaller kurvene fra forsøk 1 og forsøk 4 ved beregnet synkehastighet fra 6 ned til omkring 0,8 cm/minutt (altså over tidsrommet 10 minutter til 1 time), tilsvarende ekvivalent partikkeldiameter fra 30 ned til ca. 10 μm . Dvs. at resultatene antyder omtrent samme andel av avgangsmasse under disse grensene for synkehastighet og partikkelstørrelses i de to forsøkene. Til høyre for dette området, dvs. ved høyere beregnet synkehastighet, eller større diameter, ligger kurven fra forsøk 4 litt lavere, men siden justeringen av utsynkingstiden må anses som usikker, skal en ikke legge for stor vekt på resultatene etter kort utsynkingstid, hvor den usikre tidsjusteringen slår sterkt ut. Dessuten vil langsommere omrøring slå mest ut for grovfraksjonen, og det er rimelig at det gir en forskjell. For siste sammenlignbare fase av forsøkene, fra 1 time opp til 5-6 timer (ca. 330 minutter), var usikkerheten i STS-analysen så stor at en direkte sammenligning med resultatene i forsøk 4 ikke gir mening.

Avgangskonsentrasjonen

Forsøkene ble gjort med tre ulike avgangsmengder: 60, 300 og 3000 gram, som tilsvarer nominell totalkonsentrasjon 2, 10 og 100 g/liter ved homogen fordeling i utsynkingskolonnen. Disse forskjellene i avgangsmengde ser ut til å ha hatt betydning for utsynkingen:

Forsøk 1 og 2 ble gjennomført likt med unntak av at det ble tilsatt 300 g (10 g/l) i forsøk 1 og 60 g (2 g/l) i forsøk 2. Dersom utsynkingen var dominert av uavhengig utsynking av aggregater som var dannet under flokkuleringen, burde forsøkene hatt samme utvikling av gjenværende andel av total partikkelmasse som funksjon av tid og dyp. Resultatene viser at det ikke er tilfelle; ved starten av utsynkingen etter ca. 5 min omrøring var restandelen av avgangen 30 til 50 % større⁴ i forsøk 2 enn i forsøk 1; dvs. en noe mindre andel av avgangen i forsøk 2 hadde rukket å synke ut enn i forsøk 1. Dessuten var den relative økningen nedover i vannsøylen mindre i forsøk 2 enn i forsøk 1. Begge deler tyder på at aggregatene ved slutten av omrøringsperioden har noe mindre gjennomsnittlig størrelse i forsøk 2. Den høyere konsentrasjonen av avgang i forsøk 1 enn i forsøk 2 kan ha hatt betydning her. Partiklene og flokkulanten påvirker løsningens viskositet; i teorien vil dermed en økende mengde flokkulert avgangsmasse gi redusert G-verdi av omrøringen, noe som igjen kan gjøre at knusingen av fnokker ved omrøringen blir mindre. Den høyere tettheten av avgang i vannsøylen i forsøk 1 enn i forsøk 2 vil også innebære at det er kortere avstand mellom partiklene, slik at sannsynligheten for eventuell reflokking etter at omrøringen er stoppet, vil øke. Det ble observert en roterende bevegelse i vannsøylen i minst 2 minutter etter at omrøringen var stoppet og røreverket trukket opp, og det kan ha bidratt til reflokking.

⁴ For gjennomsnittet over 10-90 cm dyp var forskjellen ca. 30 % (Tabell 1); for gjennomsnittet 30-70 cm var den ca. 50 % (Tabell 2); og den vertikale gradienten var noe større i forsøk 1 enn i forsøk 2.

Forskjellen mellom forsøk 1 og 2 økte i løpet av utsynkingstesten; etter 1 time var restandelen suspendert stoff i vannsøylen ca. 3 ganger større i forsøk 2 enn i forsøk 1. Én mulig tolkning av det er at det skyldes videre aggregering underveis under utsynkingen, og at det er mer effektivt i forsøk 1 pga. høyere konsentrasjon. Det kan også tenkes at balansen mellom knusing og refnocking under omrøringen gjør at ulike konsentrasjoner gir større forskjell i kumulativ andel jo mindre aggregatstørrelse vi ser på, og at det bare fremtrer ettersom de grovere fraksjonene synker ut. På den annen side er kanskje det rimeligste at knusing og refnocking burde bety mest for de store fnokkene, og ikke så mye for små aggregater.

I forsøk 4 og 5 ble det tilsatt henholdsvis 300 g (10 g/l) og 3000 g (100 g/l) flokkulert avgang. Også her ble det observert en lignende effekt på konsentrasjonen av avgang ved starten av utsynkingen ved høyere avgangskonsentrasjon som beskrevet for forsøk 1 og 2 ovenfor. Selv om total mengde avgang var 10 ganger større i forsøk 5, var konsentrasjonen i kolonnen ved starten av utsynkingsfasen bare ca. 2 ganger større enn i forsøk 4. Den svakere omrøringen har sannsynligvis ført til mindre fnokk-knusing og mer fnokkoppbygging i forsøk 4 og 5 enn i de tre forutgående forsøkene, samtidig som den noe lengre omrørings tiden mellom overføring av flokkulert avgang til utsynkingskolonnen og start av utsynkingsforsøket i forsøk 5 enn i forsøk 4 kan ha ført til større grad av utsynking av grovfraksjonen før start i forsøk 5. Den høyere konsentrasjonen av avgang i forsøk 5 enn i forsøk 4 kan også ha bidratt til økt fnokkoppbygging under (og etter) omrøringen, og slik økt andelen grovfraksjon som sank ut før start (jfr. diskusjonen av forsøk 1 og 2 ovenfor). Når konsentrasjonen av avgang blir så høy som den var i forsøk 5 er det også svært sannsynlig at den raskt synkende delen av avgangen drar med seg deler av den som ikke synker like fort og slik sett ytterligere øker utsynkingshastigheten av den mer finpartikulære delen av avgangen. Det er likevel verdt å merke seg at dette endret seg etter hvert gjennom utsynkingsfasen, og at fra ca. 4 timer var restkonsentrasjonen 10 ganger større i forsøk 5 enn i forsøk 4, dvs. samme andel av total mengde. For disse forsøkene utviklet altså forskjellene seg motsatt av forholdet mellom forsøk 1 og 2; med mer lik andel av finfraksjonen under gitt synkehastighet.

Innblanding av flokkulert avgang i sjøvann

Enda en endring det er viktig å nevne er at i forsøk 4 og 5 ble det gjort en sekundær «flokkulering» i sjøvann etter den vanlige flokkuleringen i ferskvann (springvann) og før overføring til utsynkingskolonnen, dette for å simulere den mulige ekstra flokkuleringen som kan skje når den flokkulerte og konsentrerte avgangsmassen tilsettes sjøvann i blandetanken før deponering. I forsøk 4 ble dette gjort i én målesylinder, etter dekantering av ferskvann, og med nye 12 vendinger av målesylinderen for å få flokkulering før blandingen ble suspendert i utsynkingskolonnen. I forsøk 5 ble den innledende flokkuleringen gjort i 8 separate målesylindere og hele den den flokkulerte avgangen ble overført til utsynkingskolonnen under rolig omrøring. Etter dette ble det tilsatt saltlake (fortsatt under omrøring) for å justere til ønsket saltkonsentrasjon (se Vedlegg A). Selv om det ble rørt rundt under denne prosessen, er det rimelig at det gir en større utsynking av grovfraksjon på bunnen av kolonnen før utsynkingstesten begynte i forsøk 5.

4.2.2 Betydningen for restinnholdet av avgang i kolonnen ved slutten av utsynkingsforsøket

Konsentrasjonen av SS ved slutten av forsøk 1-3 (etter hhv. 5,7 timer, 1 time og 18 timer) var i størrelsesorden 30 mg/l (se Tabell 2), og som andel av total avgangsmasse utgjorde det hhv. 0,2 %, 1,5 % og 0,35 % i de tre forsøkene. Forsøk 1-3 kan ikke vise hvordan disse restandelene er fordelt på ulike synkehastigheter, bare at de i hovedsak synker langsommere enn de beregnede grensene.

I forsøk 4 og 5 ble utsynkingsperioden økt til hhv. 96 timer og 237 timer for å prøve få en bedre beskrivelse av fordelingen over synkehastighet ned til en mye mindre restandel enn i de tre første forsøkene. Av den grunn ble det også brukt en annen analysemetode, med bedre nøyaktighet, for lave konsentrasjoner (Se kapittel 2.4).

Forsøksperiodens varighet

Konsentrasjonen av SS ved slutten av disse to avsluttende forsøkene var hhv. 1,1 mg/l og 3,4 mg/l (se Tabell 1 og 2); som andel av total partikkelmasse utgjorde det bare hhv. 0,009 % og 0,003 %. Forskjellen i restandel mellom forsøk 4 og 5 kan forklares av forskjellen i varighet; for sammenlignbare tidsrom var restandelen omtrent den samme i de to forsøkene, men forsøk 5 varte lenger og endte derfor med lavere restandel suspendert (Figur 7). For siste del av forsøkene, dvs. for ekvivalent partikkeldiameter under 5 μm , er det liten forskjell mellom forsøk 4 og 5, og en tendens til litt større restandel i forsøk 5 enn i forsøk 4. Noe av denne forskjellen kan sannsynligvis tilskrives at utsynkingskolonnen i forsøk 4 ikke inneholdt finfraksjonen som ble dekantert av etter den innledende flokkuleringen. Resultatene antyder likevel at den økte partikkelkonsentrasjon i forsøk 5 ikke har gitt vesentlig større grad av flokkulering for små partikler og aggregater.

4.3 Dosering av flokkulant til hele avgangen eller kun til finfraksjonen?

Det er først og fremst finfraksjonen (<ca. 63 μm) man forventer at lett vil kunne spres i fjorden under deponering. Hvis flokkuleringen konsentreres om denne mindre fraksjonen av den samlede avgangen vil også muligvis doseringen av Magnafloc kunne reduseres. I forsøk 3 ble det derfor gjort et utsynkingsforsøk der kun finfraksjonen ble flokkulert, men hele avgangen ble overført til utsynkingskolonnen. I dette forsøket ble det også benyttet en lavere Magnafloc-dose på 2,5 mg/kg tørr avgang (tilsvarende eksisterende konsesjonsgrense) og 8 mg/kg tørr finfraksjon (<63 μm).

Et rent kvalitativt resultat av den lavere doseringen til finfraksjonen var at fnokkene som ble dannet var betydelig mindre enn de som ble observert med tilsvarende dosering til hele avgangen, i tillegg til at klarfasen var langt mer turbid. Like før overføring av avgangen til utsynkingskolonnen, da den flokkulerte finfraksjonen hadde blitt blandet med resten av avgangen og fått sedimentere én knapp time, var konsentrasjonen av SS i klarfasen ca. 1900 mg/l, tilsvarende >1 % av total avgangsmengde. Til sammenligning var SS-konsentrasjonen i klarfasen etter flokkuleringen med samme mengde avgang og én time sedimentering i forsøk 1 kun 14 mg/l, tilsvarende 0,01-0,02 % av total avgangsmengde eller 50-100 ganger mindre (se Tabell 2). I forsøk 3 utgjorde den samlede mengden SS i klarfasen før overføring av avgangen til utsynkingskolonnen ca. 0,4 % av den samlede avgangen. Siden dette var 3,5 ganger mer enn det som var igjen i kolonnen ved slutten av utsynkingsforsøket, vil dette sannsynligvis være en vesentlig feilkilde mht. hva den reelle sluttkonsentrasjonen ville vært hvis hele finfraksjonen var med.

Under omrøring i kolonnen etterpå var forskjellen mellom forsøkene mye mindre; konsentrasjon midt i kolonnen var bare 35 % høyere i forsøk 3 enn i forsøk 1. Dette er rimelig, siden det som er igjen etter dekantering i hovedsak vil ha en nedre grense for synkehastighet som bestemmes av hvor lenge målesylindren sto før dekantering.

Videre utsynking etter at omrøringen ble stoppet var vesentlig mindre effektiv i forsøk 3 enn i forsøk 1; etter 1 time var restkonsentrasjonen ca. 250 % større enn etter samme tidsrom i forsøk 1, og etter 18 timer var restkonsentrasjonen i forsøk 3 fortsatt litt større enn den var etter 2 timer i forsøk 1, og nesten dobbelt så stor som etter 5-6 timer i forsøk 1. Resultatene viser at det ikke er gunstig å skille ut finfraksjon for tilsetning av en mindre mengde Magnafloc, og dette er heller ikke tenkt for den planlagte gruvedriften. Dette er for øvrig også i tråd med muntlige anbefalinger fra Pasi Mikkola ved Magnafloc-leverandøren BASF.

Forsøk 3 anses ikke representativt for hvordan fortykker og utslippsarrangement er tenkt drevet, og kan ses bort fra i vurderingen av hvordan avgang vil spre seg.

4.4 Videre konsentrasjonsavhengig flokkulering under utsynking?

Målet med forsøkene var å få fram en ekvivalent kornfordelingskurve som kan brukes til å få realistisk utsynking, dvs. som tar hensyn til aggregering, når den brukes med Stokes' lov for uavhengig utsynking av partikler ved modellering av partikkelspredning og utsynking. I den sammenheng er det et spørsmål om resultatene kan betraktes som å vise utsynking av stabile fnokker og aggregater som dannes i første fase av forsøket, eller om de også inkluderer videre aggregering, som kan være konsentrasjonsavhengig, slik at kornfordelingskurven ikke er generelt gyldig uavhengig av videre fortynning etter utslipp. Videre aggregering kan tenkes å foregå gjennom hele forsøket, ved at de aggregatene som synker raskest kolliderer med og kombineres med mindre aggregater og partikler.

Forsøk 1 og 2 ble utført med lik prosedyre, men med ulik total partikkelkonsentrasjon i kolonnen, hhv. 10 og 2 g/liter. Som diskutert tidligere, tyder resultatene fra disse forsøkene på at høyere konsentrasjon gir en forskyvning av ekvivalent kornkurve mot større aggregater under omrøring. Det er kanskje også en tilleggseffekt av ytterligere konsentrasjonsavhengig aggregering under senere utsynkingsfase, men usikkerheten ved analysene av lave konsentrasjoner er for stor til å kunne si det sikkert.

Forsøk 4 og 5 ble også gjort med tilnærmet lik prosedyre og ulik total partikkelkonsentrasjon, hhv. 10 og 100 g/liter. Den høyeste konsentrasjonen ga mye mindre andel av partikler suspendert i kolonnen i startfasen, men som drøftet tidligere, er det ulikheter i måten den flokkulert avgangen ble suspendert i kolonnen som kan forklare dette, selv med samme ekvivalente kornfordelingskurve under omrøring. Det senere forløpet viser omtrent lik ekvivalent kornkurve for finfraksjonen i de to forsøkene, dvs. at det ikke er noen tegn til konsentrasjonsavhengig forskjell i flokkulering underveis for gjenværende finfraksjon for de to aktuelle konsentrasjonene som er brukt her.

Alt i alt er det ikke så klare tegn til aggregering under utsynking som ved tidligere forsøk uten flokkuleringsmidler (Iversen et al. 2009), men det ser ut til å kunne være til stede i en viss grad ved konsentrasjoner omkring 2-10 g/l. Det vil i så fall innebære at det bare er tilnærmet riktig å bruke en statisk inndeling av partikkelmassen i uavhengige størrelsesfraksjoner, uavhengig av konsentrasjon og fortynning.

5. Konklusjon

Innledende flokkuleringstester

Flokkuleringstestene viste at en Magnafloc-dose på ca. 15 mg/kg tørrstoff ga den laveste rest-konsentrasjonen av suspendert stoff (SS) i klarfasen etter 10 min sedimentering. Det er ikke angitt noen øvre akseptabel grense for rest-SS i klarfasen etter flokkuleringen. Resultatene fra en flokkuleringstest på kun finfraksjonen ($<63 \mu\text{m}$) av avgangen antyder at doseringen bør gjøres til hele avgangen. Dette er i tråd med muntlige anbefalinger fra Pasi Mikkola ved Magnafloc-leverandøren BASF.

Effektiv kornfordelingskurve bestemt fra utsynkingsforsøkene

Tabellen under viser det beste estimatet for en effektiv kornfordelingskurve for den flokkulerte avgangen. Den er satt sammen av resultatene fra utsynkingsforsøk 1 og 4, begge med 10 g/l flokkulert avgang i utsynkingskolonnen. For forsøk 1 er den utjevnete kurven benyttet slik at det blir en monotont økende kumulativ fordeling for finfraksjon, som også er skjønnsmessig forlenget litt i retning store

synkehastigheter på bakgrunn av den observerte konsentrasjonsprofilen under omrøring før utsynkingsforsøket ble startet. I forsøk 4 var flere av betingelser endret for å kunne gi en bedre beskrivelse av utsynkingen av den aller fineste fraksjonen av avgangen enn det som var mulig i forsøk 1: i) pre-flokkulering i sjøvann før overføring til utsynkingskolonnen, ii) lavere omrøringshastighet i utsynkingskolonnen før oppstart av utsynkingsforsøket for å redusere knusing av allerede oppbygde fnokker, iii) forlenget forsøksperiode og iv) en mer nøyaktig metode (lavere deteksjonsgrense) for å bestemme konsentrasjonen av partikler i vannsøylen mot slutten av utsynkingsforsøket. Siden ca. 81 % av den flokkulerte avgangen bestod av så store partiklene at de hadde sunket ut av vannsøylen allerede før utsynkingsforsøket ble startet (under rolig omrøring) selv i forsøk 1, er det ikke gitt noe estimat for denne partikkelfraksjonen. Utsynkingshastigheten til den aller minste størrelsesfraksjonen av den flokkulerte avgangen (<ca. 0,009 %) lot seg ikke bestemme ut fra forsøk 4. Men i forsøk 5, der konsentrasjonen av flokkulert avgang ble økt til 100 g/l og forsøksperioden ytterligere forlenget, var det mulig å bestemme utsynkingshastigheten for den kumulative partikkelfraksjonen helt ned til 0,0033 %: ekvivalent diameter på 0,68 µm og estimert synkehastighet på 0,003 cm/min (5,25E-07 m/s). Forsøkene kan ikke si noe om utsynking av partikkelfraksjonen under dette, ut over at den har synkehastigheter som er lavere enn denne nedre grensen. Den effektive kornfordelingskurven som er gjengitt i tabellen under kan anses å gi et rimelig godt bilde av den utsynkingen som kan forventes etter bruk av Magnafloc 155 og med flokkulering i sjøvann. Denne kornfordelingskurven kan eventuelt forlenges ned til en ekvivalent partikkeldiameter på 0,68 µm med verdier fra forsøk 5, som angitt over.

Tabell 5. Beste estimatet for en effektiv kornfordelingskurve for den flokkulerte avgangen.

| Forsøksnr. | Kumulativ partikkelfraksjon | Synkehastighet | | Ekvivalent diameter (µm) |
|------------|-----------------------------|----------------|---------|--------------------------|
| | | cm/minutt | m/s | |
| 1 | 0,40 | 120 | 2,0E-02 | 132 |
| | 0,18 | 50 | 8,3E-03 | 85 |
| | 0,10 | 25 | 4,2E-03 | 60 |
| | 0,045 | 12 | 2,0E-03 | 42 |
| | 0,030 | 8 | 1,3E-03 | 34 |
| | 0,016 | 5 | 8,3E-04 | 27 |
| | 0,0080 | 2,5 | 4,2E-04 | 19 |
| | 0,0045 | 0,8 | 1,3E-04 | 11 |
| 4 | 0,0018 | 0,40 | 6,6E-05 | 7,6 |
| | 0,00063 | 0,19 | 3,2E-05 | 5,3 |
| | 0,00032 | 0,10 | 1,6E-05 | 3,8 |
| | 0,00013 | 0,033 | 5,4E-06 | 2,2 |
| | 0,00009 | 0,008 | 1,3E-06 | 1,1 |

6. Litteraturliste

Iversen E., Bjerkeng B. og Forfang I. (2009) Fysisk/kjemiske egenskaper til eklogitt og avgang. WP 4 i ”Reguleringsplan med konsekvensutredning for utvinning av rutil i Engebøfjellet i Naustdal kommune”, NIVA-prosjekt O-27199 med Nordic Mining som kunde. NIVA-notat.

Sharqawy, M. H., Lienhard, J.H. og Zubair, S.M. (2010): Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment, vol. 16(2010), pp. 354-380

(<http://www.deswater.com/vol16.php>)

http://web.mit.edu/lienhard/www/Thermophysical_properties_of_seawater-DWT-16-354-2010.pdf

http://web.mit.edu/seawater/Seawater_Property_Tables.pdf

Vedlegg A. Detaljert beskrivelse av flokkuleringen og overføringen til sjøvann under utsynkingsforsøkene

Det ble kjørt fem utsynkingstester med variasjoner i avgangsmengde, flokkulantdose og hvordan flokkulantdoseringen ble gjort under flokkuleringen:

1. I utsynkingstest nr. 1 ble det brukt 300 g avgang, tilsvarende en total avgangskonsentrasjon på 10 g/liter i utsynkingskolonnen⁵. Avgangen ble overført til en 2 L målesylinder med springvann (15 % avgang). Målesylinderen med avgang ble korket igjen og vendt om noen ganger for god blanding. Umiddelbart etter dette ble det tilsatt 4,5 ml 0,1 % Magnafloc 155 stokkløsning, som tilsvarer 15 mg/kg tørrstoff avgang. Målesylinderen ble korket igjen og rolig vendt om 12 ganger for innblanding av flokkulanten, og så satt til sedimentering i 1 time. Etter dette ble klarfasen på ca. 1,8 liter dekantert av og rest-konsentrasjonen av SS i denne ble bestemt. Den flokkulerte og sedimenterte avgangen ble resuspendert i omtrent 500 ml sjøvann og overført til utsynkingskolonnen i løpet av ca. 1 min.
2. I utsynkingstest nr. 2 ble det brukt 60 g avgang, tilsvarende en total avgangskonsentrasjon på 2 g/liter i utsynkingskolonnen. Avgangen ble overført til en målesylinder med 400 ml springvann (15 % avgang). Det ble benyttet samme flokkulantdose (15 mg/kg tørrstoff avgang; 0,9 ml 0,1 % Magnafloc 155 stokkløsning), og flokkuleringsprosedyren var som i utsynkingstest nr. 1. Klarfase på ca. 350 ml ble dekantert av og restkonsentrasjonen av tørrstoff i denne ble bestemt. Deretter ble den flokkulerte avgangen resuspendert i sjøvann og overført til utsynkingskolonnen. Prosedyren var altså som i forsøk 1, bortsett fra at det ble brukt en mindre mengde avgang og tilsvarende mindre vannvolumer og Magnafloc-tilsetning ved flokkuleringen.
3. I utsynkingstest nr. 3 ble det igjen brukt 300 g avgang som i forsøk 1, men med lavere flokkulantdose og primær flokkulering kun av avgangens finfraksjon. Avgangen ble først siktet gjennom en 63 µm sil (se Figur 8A). De 93,9 g (31 %) som gikk gjennom silen ble overført til en målesylinder med 400 ml springvann (23,5 % avgang). Målesylinderen med avgang ble korket igjen og vendt om noen ganger for god blanding. Umiddelbart etter dette ble det tilsatt 0,75 ml 0,1 % Magnafloc 155 stokkløsning, som tilsvarer 2,5 mg/kg tørrstoff avgang (eller ca. 8 mg/kg finfraksjon). Dette samsvarer med dagens konsesjonsgrense for bruk av Magnafloc 155. Målesylinderen ble korket igjen og rolig vendt om 12 ganger for innblanding av flokkulanten. Etter dette ble resten av avgangen sammen med den flokkulerte finfraksjonen overført til et 1 L begerglass med rolig omrøring (20 rpm) i ca. 15 min med en bladomrører satt så nær bunnen som mulig (se Figur 8.B). Etter ytterligere ca. 45 min stillstand ble klarfasen dekantert av og rest-konsentrasjonen av SS i denne ble bestemt. Volumet av klarfasen ble målt til 1760 ml. Den flokkulerte avgangen ble resuspendert i omtrent 500 ml sjøvann og overført til utsynkingskolonnen i løpet av ca. 1 min.
4. I utsynkingstest nr. 4 var både avgangsmengde og Magnafloc-dosering som i test nr. 1 (300 g avgang, 15 mg Magnafloc/kg tørrstoff). Tilsetning av Magnafloc i ferskvann med flokkulering, sedimentering i en time og dekantering av klarfase ble også gjort som i forsøk nr. 1, men den videre fremgangsmåten var litt annerledes. Den flokkulerte avgangen ble tilsatt omtrent like stor mengde sjøvann som ferskvannsmengden som ble dekantert av, og målesylinderen ble vendt relativt rolig om 12 ganger for sekundær flokkulering før avgangen ble suspendert i utsynkingskolonnen. Den flokkulert avgang i sjøvann ble overført samlet til utsynkingskolonnen under rolig omrøring (30 rpm) i løpet av 1 min. I dette forsøket ble det gjort forsøk på å filtrere finfraksjonen fra klarfasen for å få den med i utsynkingsforsøket, men det var ikke mulig å få frigjort filtratet uten å få med deler av filtermaterialet. Det ble også gjort utsynkingstester på klarfasen for å se om lengre sedimenteringstid før dekantering ville gi mer fullstendig utfelling. Resultatet tyder ikke på at det er tilfelle (resultater ikke vist).

⁵ Teoretisk konsentrasjon hvis hele avgangsmengden var fordelt i utsynkingskolonnen med 30 liter vann. I realiteten var målte konsentrasjonen i starten av utsynkingstestene langt lavere, fordi det meste av avgangen sedimenterte under omrøring før start av utsynkingstesten.

5. I utsynkingstest nr. 5 ble det brukt i alt 3000 g avgang, som gir 100 g/l i utsynkingsfasen. I motsetning til de fire første testene ble det her ikke helt av noen klarfase med ferskvann; i stedet ble det tilsatt saltlake for å få med effekten av flokkulering i sjøvann: Den innledende flokkuleringen ble gjort i 8 stk 2 L målesylindere etter samme lest som i forsøk 1 og 4, men med 375 g tørr avgang i 2 L springvann (18,8 % avgang). Tilsatsen av stokkløsningen med Magnafloc ble justert slik at sluttkonsentrasjonen var den samme som i forsøk 1, 2 og 4 (15 mg /kg tørrstoff avgang). Etter 1 time sedimentering ble den flokkulerte avgangen forsiktig resuspendert og overført til kolonnen under rolig omrøring (30 rpm) i løpet av 3-5 min. Omrøringen i kolonnen ble gjort på samme måte som i test nr. 4, med hastighet 30 rpm og skråstilte blader på omrører. De 16 L med springvann ble deretter tilsatt 13,09 L saltlake (sjøvann tilsatt 575 g sjøsalt [Instant Ocean, Aquarium Systems] med en estimert saltkonsentrasjon på 77,9 %) for å justere den endelige saliniteten i utsynkingskolonnen til ca. 34 ‰. Det viste seg at saliniteten ble noe høyere: 39,6. Det ble rørt forsiktig rundt for å få sekundær flokkulering i sjøvann og for å få fordelt partikkelmassen i kolonnen. Samlet tid for overføring av flokkulert avgang til utsynkingskolonnen, tilførsel av saltlake og sjøvannsflokkulering var ca. 10 min. På denne måten fikk en hele finfraksjonen av partikler med i utsynkingstesten, i motsetning til de andre forsøkene, hvor en liten mengde finstoff ble fjernet ved dekantering av klarfasen etter flokkuleringen.

I alle forsøkene ble innholdet i utsynkingskolonnen tilslutt rørt om i ca. 5 minutter, med 150 rpm i forsøk 1-3 og 30 rpm med større, skråttstilte rotorblader i forsøk 4 og 5, før det ble tatt ut null-prøver. Deretter ble omrøringen stoppet og røreverket tatt ut.



Figur 8. A) Sikting av avgang gjennom en sil med lysåpning på 63 μm og ned i en samleskål. **B)** Innblanding av restavgang med den flokkulerte finfraksjonen ved hjelp av bladomrører på rolig omrøring (20 rpm).

Vedlegg B. Bestemmelse av minimumsdose Magnafloc 155 som gir tilfredsstillende flokkulering av avgangen

B.1 Metode

Det ble gjort et innledende forsøk for å bestemme minimumsdosen av Magnafloc 155 som gir tilfredsstillende flokkulering av avgangens finfraksjon i ferskvann. Det ble tatt utgangspunkt i en protokoll anbefalt og tilsendt fra BASF ved Pasi Mikkola:

- En 500 ml målesylinder ble tilsatt springvann og 25 g knust malm (avgang) slik at totalvolumet ble 500 ml. Dette tilsvarte 5 vekt% tørrstoff.
- Målesylinderen med avgang ble korket igjen og vendt om noen ganger for god blanding.
- Umiddelbart etter dette ble det tilsatt 25-1250 µl 0,1 % Magnafloc 155 stokkløsning til målesylinderen med avgangsslurrien (tilsvarende 1-50 mg Magnafloc 155/kg tørrstoff avgang), målesylinderen korket igjen og rolig vendt om enten 3 eller 12 ganger for innblanding av flokkulanten, og så satt til sedimentering. Det viste seg at 3 ganger omvending ikke var tilstrekkelig for god innblanding.⁶
- Etter 10 min ble det tatt ut prøve med pipette fra ca. midt i vannsøylen for bestemmelse av suspendert stoff (SS) (se Kapittel 2.5).

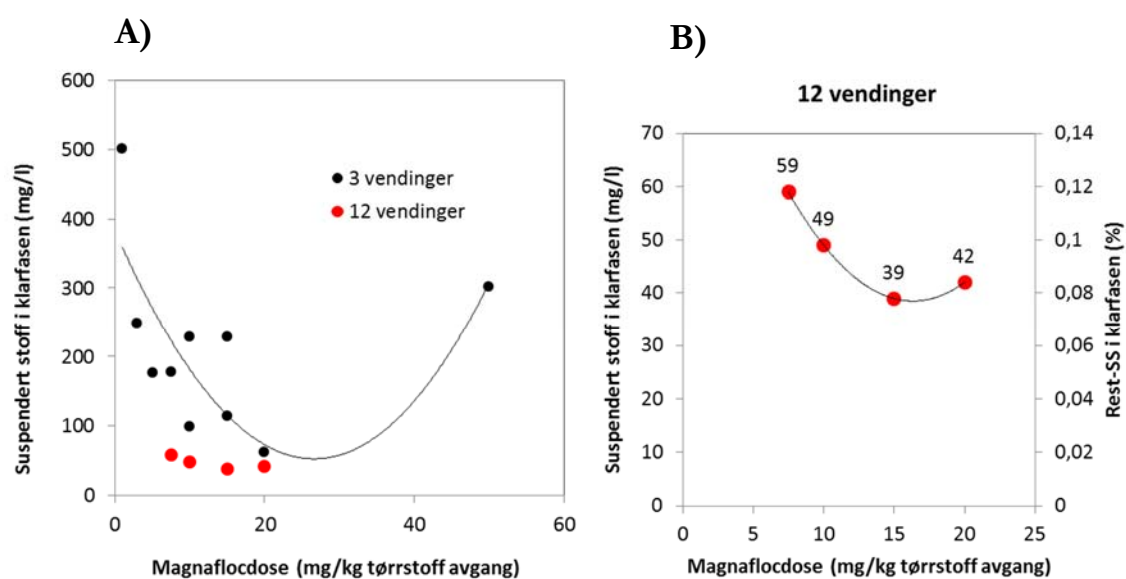
B.2 Resultat

Resultatet er vist i Figur 9. Protokollen fra BASF anbefaler å benytte 3 vendinger for innblanding av flokkulanten i avgangsslurrien, men som den store spredningen i måleverdiene i Figur 9A viser, var dette ikke tilstrekkelig. Vurderingene blir derfor basert på testene der 12 vendinger ble benyttet. Figur 9B viser resultatene fra testene med 12 vendinger alene.

En Magnafloc-dose på ca. 15 mg/kg tørrstoff ga en rest-SS i klarfasen etter 10 min sedimentering på 39 mg/l eller 0,08 % av start-konsentrasjonen (50.000 mg/l). Ved lavere doser ble rest-konsentrasjonen noe høyere. Laveste dose som ble testet med 12 vendinger var 8 mg/kg tørrstoff; det ga en restkonsentrasjon av partikler på ca. 60 mg/l. Det ble kun testet én høyere dose⁷ med 12 vendinger (20 mg/kg tørrstoff), og denne ga litt høyere rest-konsentrasjon SS (42 mg/l) enn 15 mg/kg tørrstoff, men forskjellen er antagelig innenfor måleusikkerheten. Det er verdt å legge merke til at den laveste dosen som ble testet, 1 mg/kg tørrstoff, også ga en betydelig effekt, selv om det bare ble gjort med 3 vendinger; kun 1 % av den opprinnelige SS var igjen. Det må påpekes at det ikke ble kjørt noen referanse uten tilsats av flokkulant.

⁶ Det var ikke mulig å måle synkehastigheten til slurriens øvre kant, slik BASF sin protokoll anbefalte. Til det sank slurrien for raskt.

⁷ I forsøket der målesylinderen ble vendt 3 ganger ble det også testet en Magnafloc-dose på 50 mg/kg tørrstoff.



Figur 9. Resultater fra flokkuleringstester i 500 ml målesylinder med 5 vekt% avgang i springvann tilsatt økende doser Magnafloc 155. Suspendert stoff (SS) ble målt i klarfasen etter 10 min sedimentering.
A) Resultater fra tester der målesylinderen ble vendt om 3 eller 12 ganger for innblanding av flokkulanten. Kurven viser en 2. ordens polynomtilpasning av måleverdiene for 3 omvendinger av målesylinderen.
B) Resultatene for tester med 12 omvendinger av målesylinderen. Rest-SS i klarfasen er her også angitt. Kurven viser en 2. ordens polynomtilpasning av måleverdiene.

NIVA: Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

NIVA gir offentlig vannforvaltning, næringsliv og allmennheten grunnlag for god vannforvaltning gjennom oppdragsbasert forsknings-, utrednings- og utviklingsarbeid. NIVA kjennetegnes ved stor faglig bredde og godt kontaktnett til fagmiljøer i inn- og utland. Faglig tyngde, tverrfaglig arbeidsform og en helhetlig tilnærmingssmåte er vårt grunnlag for å være en god rådgiver for forvaltning og samfunnsliv.



Norsk institutt for vannforskning

Gaustadalléen 21 • 0349 Oslo
Telefon: 02348 • Faks: 22 18 52 00
www.niva.no • post@niva.no